การกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศ โดยใช้เครื่องกรองชีวภาพ

REMOVAL OF VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS IN THE ATMOSPHERE BY USING BIOFILTERS

วราพร งามขำ
สาริน สังข์เงิน
อภิชญา จิรจำเนียรกาล

สหกิจศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

REMOVAL OF VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS IN THE ATMOSPHERE BY USING BIOFILTERS

WARAPORN NGAMKHAM
SARIN SUNGNGUEN
APICHAYA JIRAJAMNAINKARN

COOPERATIVE EDUCATION SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (ENVIRONMENTAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMSITRY, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อสหกิจศึกษา	การกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพ REMOVAL OF VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS IN THE ATMOSPHERE BY USING BIOFILTERS
ชื่อนักศึกษา	นางสาววราพร งามขำ รหัสนักศึกษา 59050609 นายสาริน สังข์เงิน รหัสนักศึกษา 59050622 นางสาวอภิชญา จิรจำเนียรกาล รหัสนักศึกษา 59050631
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชา	เคมี
ปีการศึกษา	2562
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กรองแก้ว ทิพยศักดิ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้สหกิจศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม) ประจำปีการศึกษา 2562

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ ประธานกรรมการ	
นางสาวพัชรินทร์ เงินใบอ่อน กรรมการ	
ผศ.กรองแก้ว ทิพยศักดิ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อสหกิจศึกษา	การกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพ		
ชื่อนักศึกษา	นางสาววราพร	งามขำ	รหัสนักศึกษา 59050609
	นายสาริน	สังข์เงิน	รหัสนักศึกษา 59050622
	นางสาวอภิชญา	จิรจำเนียรกาล	รหัสนักศึกษา 59050631
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)		
ภาควิชา	เคมี		
คณะ	วิทยาศาตร์		
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)		
ปีการศึกษา	2562		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กรองแก้ว ทิพยศักดิ์		

บทคัดย่อ

รายงานสหกิจศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการ การวิจัยครั้งนี้มีการใช้ตัวกลางหลัก 3 ประเภท ได้แก่ ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยมูลไก่ และถ่านกัมมันต์ ตัวกลางเสริม 2 ประเภท ได้แก่ กาบมะพร้าว และไบโอมีเดีย โดยตัวกลางเสริมมีหน้าที่ป้องกันการทรุดตัวของตัวกลางในเครื่องกรองชีวภาพ และช่วยเพิ่มการยึดเกาะของจุลินทรีย์ บรรจุตัวกลางลงเครื่องกรองชีวภาพ โดยเครื่องกรองชีวภาพมีขนาด 10.35 ลิตร ชั้นตัวกลางแบ่งออกเป็น 2 ชั้น ชั้นล่างบรรจุตัวกลางผสม (ปุ๋ยหมัก, ปุ๋ยมูลไก่, กาบมะพร้าว, ไบโอมีเดีย) ชั้นบนบรรจุตัวกลางประเภทถ่านกัมมันต์ โดยเครื่องกรองชีวภาพมี 3 ชุดการทดลอง ได้แก่ ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยมูลไก่ และปุ๋ยผสม ในอัตราส่วนตัวกลางหลักต่อตัวกลางเสริม 60:40 โดยปริมาตร ทำการจำลองสถานการณ์แปรความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่ายเท่ากับ 1.2, 2.0 และ4.0 ส่วนในล้านส่วน (ppm_v) ตามลำดับ แล้วปล่อยเข้าระบบเครื่องกรองชีวภาพ เวลากักพัก (Empty Bed Residence Time, EBRT) 60 วินาที ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ใช้ตัวกลางปุ๋ยผสมเป็นตัวกลางที่มีประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายสูงที่สุด โดยประสิทธิภาพการบำบัดที่ความเข้มข้น 1.2, 2.0 และ 4.0 ppm_v เท่ากับ 71.52, 83.08 และ 90.82 % ตามลำดับ

คำสำคัญ : สารอินทรีย์ระเหยง่าย, เครื่องกรองชีวภาพ, เวลากักพัก, ปุ๋ยหมัก, ปุ๋ยมูลไก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Removal of Volatile Organic Compounds in the Atmosphere by Using Biofilters		
Students	Miss.Waraporn	Ngamkham	Student ID 59050609
	Mr.Sarin	Sungnguen	Student ID 59050622
	Miss.Apichaya	Jirajamnainkarn	Student ID 59050631
Degree	Bachelor of Science (Environmental Chemistry)		
Department	Chemistry		
Faculty	Science		
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
Academic Year	2019		
Advisor	Asst. Prof. Krongkaew Tippayasak		

Abstract

This cooperative education report aims to remove Volatile Organic Compounds (VOCs) by using the laboratory - scale biofilter. The main media, such as compost, chicken manure, and activated carbon were used. The two supported media coconut coir and bio - media, were also used to prevent a collapsing in biofilter and increasing the adhesion surface of microorganisms. These media were packed into 10.35 liters bottle to construct biofilter. Each biofilter was devided in two layers. The lower layer contained with mixed media (compost, chicken manure, coconut coir, bio - media), then top layer contained activated carbon. There were three packs of biofilter : compost, chicken manure, and mixed of both with a ratio of main media and support media at 60 : 40 by volume. All were examined for VOCs concentration from simulated air 1.2, 2.0, and 4.0 ppm_v, respectively. Then let simulated air into the biofilter with empty bed residence time (EBRT) 60 seconds. The result showed that the VOCs removal efficiency by mixed of compost and chicken manure fertilizer as main media was the highest efficiency of 1.2, 2.0, and 4.0 ppm_v equal to 71.52, 83.08, and 90.82 percent, respectively.

Keywords : Volatile Organic Compounds (VOCs), Biofilter, Empty Bed Residence Time (EBRT), Compost, Chicken Manure

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานสหกิจศึกษาเล่มนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณา และความอนุเคราะห์จากผู้มีพระคุณหลายท่านที่ให้คำแนะนำ และการช่วยเหลือในหลาย ๆ ด้านตลอดระยะเวลาที่ทำโครงงานสหกิจศึกษาจนทำให้โครงงานสหกิจศึกษานี้สำเร็จอย่างสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุกท่านเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ผศ. กรองแก้ว ทิพยศักดิ์ ที่ปรึกษาโครงงานสหกิจศึกษาเป็นอย่างสูง ที่ให้คำแนะนำ และคำปรึกษา ทั้งยังมอบความรู้ ความเอาใจใส่ ชี้แนะแนวทาง จุดบกพร่อง และปรับปรุงแก้ไขจนทำให้โครงงานสหกิจศึกษาสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ดร. กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ ประธานกรรมการ และคุณพัชรินทร์ เงินใบอ่อน กรรมการผู้คุมสอบ ที่ได้เสียสละเวลาอันมีค่าในการเข้าร่วมรับฟังโครงงานสหกิจศึกษานี้ พร้อมทั้งให้คำแนะนำ และชี้แนะข้อบกพร่อง อันเป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุง พัฒนาให้โครงงานสหกิจศึกษาเล่มนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คุณรุ่งโรจน์ จิวะสุรัตน์ และ คุณธนภพ เลิศมหาฤทธิ์ ที่ปรึกษาตลอดช่วงระยะเวลาที่ทำโครงงานสหกิจศึกษานี้ และขอขอบพระคุณหน่วยงานสิ่งแวดล้อมทุกท่านที่ให้คำแนะนำ ข้อชี้แนะ และความเอาใจใส่ในการทำโครงงานสหกิจศึกษา ณ บริษัท สยามคูโบต้า คอร์ปอเรชั่น จำกัด

ขอขอบพระคุณ คุณชัชชัย ลัทธิลักขณา คุณณัฐพล ไกรธรรม เจ้าหน้าที่นักวิทยาศาตร์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการดำเนินงาน การจัดหาเครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีต่าง ๆ สำหรับใช้ในการทำโครงงานสหกิจศึกษา

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อนๆทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวนามไว้ในที่นี้ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำต่าง ๆ ทั้งยังเป็นกำลังใจที่สำคัญในการทำโครงงานสหกิจศึกษา ทำให้โครงงานสหกิจศึกษาเล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

วราพร งามขำ
สาริน สังข์เงิน
อภิชญา จิรจำเนียรกาล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....ข
กิตติกรรมประกาศ.....ค
สารบัญ.....ง
สารบัญตาราง.....ซ
สารบัญรูป.....ญ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....3
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs).....3
2.1.1 ความหมายของสารอินทรีย์ระเหยง่าย/สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย.....3
2.1.2 ชนิด คุณสมบัติทั่วไป และแหล่งที่มาของสารอินทรีย์ระเหยง่าย.....4
2.1.3 แหล่งที่มาของสารอินทรีย์ระเหยง่าย.....5
2.2 การบำบัดทางชีวภาพ.....8
2.3 กลไกของเครื่องกรองชีวภาพ.....10
2.3.1 การถ่ายเทก๊าซ (Gas Transfer).....10
2.3.2 น้ำ (The Water Phase).....11
2.3.3 การดูดซับสารมลพิษ (Adsorbed Contaminants).....11
2.3.4 การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation).....12
2.3.5 ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น (Product Generation).....13
2.3.6 พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้น (Heat Generation).....14
2.4 ประเภทของจุลินทรีย์ที่ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย.....15
2.5 หลักเกณฑ์ในการเลือกตัวกลางที่เหมาะสม.....17
2.5.1 ปริมาณธาตุอาหารอนินทรีย์.....17
2.5.2 ปริมาณสารอินทรีย์.....18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.3 ลักษณะการดูดซับและความพรุน 18
2.5.4 การยึดเกาะของแบคทีเรีย 18
2.5.5 สมบัติทางกลศาสตร์ 18
2.5.6 ค่าใช้จ่ายของวัสดุตัวกลาง อายุการใช้งานและการจำกัดตัวกลางที่หมดอายุ....19
2.6 ประเภทตัวกลางในเครื่องกรองชีวภาพ 19
2.6.1 ตัวกลางประเภทอินทรีย์ 19
2.6.2 ตัวกลางประเภทอนินทรีย์และตัวกลางสังเคราะห์ 20
2.7 พารามิเตอร์ในการควบคุมและการออกแบบระบบ 22
2.7.1 อุณหภูมิ (Temperature) 22
2.7.2 ปริมาณน้ำ (Water Content) 23
2.7.3 จุลินทรีย์ 25
2.7.4 ปัจจัยจำกัดด้านออกซิเจน (Oxygen Limitation) 25
2.7.5 ความเป็นกรด – ด่างของตัวกลาง (Medium pH and Alkalinity) 26
2.7.6 ภาระบรรทุกสารมลพิษ (Contaminant Load and Surface Load) 26
2.7.7 ธาตุอาหาร (Nutrients) 26
2.8 ตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพของระบบ 27
2.8.1 เวลากักพัก (Empty Bed Residence Time, EBRT) 27
2.8.2 ภาระบรรทุก (Mass Loading) 27
2.8.3 ประสิทธิภาพการบำบัด (Removal Effciency) 28
2.8.4 ความสามารถในการกำจัดสารมลพิษ (Elimination Capacity) 28
2.8.5 ความสามารถในการกำจัดสูงสุด (Maximum Elimination Capacity) 28
2.8.6 ภาระบรรทุกวิกฤติ (Critical Loading) 28
2.9 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 29
2.9.1 Eakchai Lertphadungwit (2004) 29
2.9.2 Jirawat Kanpayan (2005) 29
2.9.3 Nttapol Rattanamuk (2006) 29
2.9.4 Wongpun Limpaseni (2018) 30
2.9.5 Munna Kumar (2019) 30
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย 31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์....31
3.2 แผนการทดลอง....32
3.2.1 วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุตัวกลาง....32
3.2.2 การจำลองสถานการณ์ปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยง่าย....32
3.2.3 การเทียบเครื่องมือวัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย....33
3.2.4 เครื่องกรองชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการ....34
3.2.5 ประเภทและอัตราส่วนผสมของวัสดุตัวกลาง....35
3.2.6 วัสดุที่ใช้เป็นตัวกลางหลักในการทดลอง....35
3.2.7 วัสดุที่ใช้เป็นตัวกลางเสริมในการทดลอง....36
3.2.8 การทดลองประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายแบบไม่ต่อเนื่อง....36
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล....37
4.1 คุณสมบัติของวัสดุตัวกลาง....37
4.1.1 ความหนาแน่น (Density)....37
4.1.2 ความพรุน (Porosity)....38
4.1.3 ความชื้น (Moisture Content)....38
4.1.4 ความเป็นกรด - ด่าง (pH)....38
4.1.5 อินทรียวัตถุ (Organic Matter)....38
4.1.6 ปริมาณธาตุอาหารของปุ๋ยหมักและปุ๋ยมูลไก่....39
4.2 ผลการจำลองสถานการณ์และการเทียบเครื่องมือวัด....39
4.2.1 การจำลองสถานการณ์ปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยง่าย....39
4.2.2 การเทียบเครื่องมือวัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย....40
4.3 ผลของตัวกลางและตัวแปรที่เหมาะสม....42
4.3.1 ความชื้นสัมพัทธ์และความชื้นของตัวกลาง....42
4.3.2 ความเป็นกรด – ด่างของชั้นตัวกลาง....44
4.3.3 อุณหภูมิของชั้นตัวกลาง....44
4.3.4 การทรุดตัวของชั้นตัวกลาง....44
4.3.5 ประสิทธิภาพการบำบัด....45
4.3.6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวกลางทั้ง 3 ประเภท....47
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ....49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.1 สรุปผลการวิจัย 49
5.2 ข้อเสนอแนะ 49
เอกสารอ้างอิง 50
ภาคผนวก 50
ภาคผนวก ก 53
ภาคผนวก ข 57
ภาคผนวก ค 61
ภาคผนวก ง 106

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 การจำแนกสารอินทรีย์ระเหยง่ายตามลักษณะโมเลกุลของสาร 4
2.2 ลักษณะของถังปฏิกิริยาชีวภาพชนิดต่าง ๆ (Devinny et al., 1999) 10
2.3 จุลินทรีย์ในเครื่องกรองชีวภาพสำหรับกำจัด BTEX และ VOCs 15
2.4 คุณสมบัติของวัสดุที่นิยมใช้เป็นตัวกลาง 21
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ 31
3.2 วิธีทดสอบลักษณะคุณสมบัติของวัสดุตัวกลางที่เลือกใช้ 32
3.3 อัตราส่วนผสมตัวกลางของแต่ละชุดการทดลอง 35
4.1 คุณสมบัติของตัวกลางหลัก 39
ข - 1 ผลการทดสอบความหนาแน่น 57
ข - 2 ผลการทดสอบความพรุน 57
ข - 3 ความเป็นกรด - ด่างของตัวกลางหลัก 58
ข - 4 ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Organic Matter, OM) 58
ข - 5 ไนโตรเจนทั้งหมดในตัวกลางหลัก (Total Nitrogen ; N) 58
ข - 6 ฟอสฟอรัสในตัวกลางหลัก 59
ข - 7 โพแทสเซียมในตัวกลางหลัก 59
ค - 1 ความชื้นของตัวกลางปุ๋ยหมัก 61
ค - 2 ความชื้นของตัวกลางปุ๋ยมูลไก่ 62
ค - 3 ความชื้นของตัวกลางปุ๋ยผสม 63
ค - 4 ค่าความเป็นกรด - ด่างของตัวกลาง 64
ค - 5 อุณหภูมิของตัวกลาง 66
ค - 6 ความสูงของตัวกลาง 68
ค - 7 ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยหมัก C1 ที่ความเข้มข้น 1.2 ppm 70
ค - 8 ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยหมัก C2 ที่ความเข้มข้น 1.2 ppm 72
ค - 9 ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยหมัก C1 ที่ความเข้มข้น 2.0 ppm 74
ค - 10 ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยหมัก C2 ที่ความเข้มข้น 2.0 ppm 76
ค - 11 ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยหมัก C1 ที่ความเข้มข้น 4.0 ppm 78
ค - 12 ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยหมัก C2 ที่ความเข้มข้น 4.0 ppm 80
ค - 13 ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยมูลไก่ C1 ที่ความเข้มข้น 1.2 ppm 82
ค - 14 ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยมูลไก่ C2 ที่ความเข้มข้น 1.2 ppm 84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

ค - 15 ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยมูลไก่ C1 ที่ความเข้มข้น 2.0 ppm....86
ค - 16 ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยมูลไก่ C2 ที่ความเข้มข้น 2.0 ppm....88
ค - 17 ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยมูลไก่ C1 ที่ความเข้มข้น 4.0 ppm....90
ค - 18 ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยมูลไก่ C2 ที่ความเข้มข้น 4.0 ppm....92
ค - 19 ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยผสม C1 ที่ความเข้มข้น 1.2 ppm....94
ค - 20 ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยผสม C2 ที่ความเข้มข้น 1.2 ppm....96
ค - 21 ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยผสม C1 ที่ความเข้มข้น 2.0 ppm....98
ค - 22 ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยผสม C2 ที่ความเข้มข้น 2.0 ppm....100
ค - 23 ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยผสม C1 ที่ความเข้มข้น 4.0 ppm....102
ค - 24 ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยผสม C2 ที่ความเข้มข้น 4.0 ppm....104
ง - 1 ผลการทดสอบความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกิดจากวัสดุตัวกลาง....106
ง - 2 การจำลองสถานการณ์ปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยง่าย....107

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

2.1 แหล่งที่มาของสารอินทรีย์ระเหยง่ายจากกิจกรรมของมนุษย์ 7
2.2 แหล่งกำเนิดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในสหรัฐอเมริกา ปี ค.ศ. 2005 7
2.3 กลไกภายในของเครื่องกรองชีวภาพ 9
2.4 แผนผังไดอะแกรมของเครื่องกรองชีวภาพ 9
2.5 การดูดซับภายในเครื่องกรองชีวภาพ 11
2.6 กระบวนการเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพและกระบวนถ่ายเทมวลสารในเครื่องกรองชีวภาพ 14
2.7 ผลของอุณหภูมิต่อชนิดของจุลินทรีย์และกิจกรรมในเครื่องกรองชีวภาพ 23
2.8 การกระจายของน้ำในตัวกลางที่มีรูพรุน 24
2.9 การเปรียบเทียบระบบการทำงานของเครื่องกรองชีวภาพ 27
2.10 ความสามารถในการกำจัดสูงสุดและภาระบรรทุกวิกฤติ 28
3.1 แผนภาพการจำลองสถานการณ์ปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยง่าย 34
3.2 เครื่องมือวัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย 34
3.3 แผนภาพเครื่องกรองชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการ 34
3.4 วัสดุที่ใช้เป็นตัวกลางหลัก 36
3.5 วัสดุที่ใช้เป็นตัวกลางเสริม 36
4.1 กลไกการทำงานของเครื่องกรองชีวภาพ 40
4.2 การเปรียบเทียบเครื่องมือวัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในสภาวะต่างๆ 40
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของตัวกลางทั้ง 3 ประเภทในช่วงระยะเวลาที่เดินระบบ 42
4.4 ความชื้นสัมพัทธ์ของตัวกลางที่มีความเข้มข้นต่างๆในระยะเวลาที่เดินระบบ 42
4.5 การทรุดตัวของตัวกลางประเภทต่างๆในระยะเวลาที่เดินระบบ 43
4.6 ประสิทธิภาพการบำบัด VOCs ตัวกลางปุ๋ยหมัก 45
4.7 ประสิทธิภาพการบำบัด VOCs ตัวกลางปุ๋ยมูลไก่ 47
4.8 ประสิทธิภาพการบำบัด VOCs ตัวกลางปุ๋ยผสม 47
4.9 ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายของตัวกลางทั้ง 3 ประเภท 47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
C_{ads}	มวลของสารปนเปื้อนที่ถูกดูดซับต่อมวลของตัวดูดซับ
C_G	ความเข้มข้นของสารในอากาศ
C_{in}	ความเข้มข้นของมลพิษที่เข้าระบบ
C_L	ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนที่เหลืออยู่ในสารละลาย ณ สภาวะสมดุล
C_{max}	ความเข้มข้นของสารมลพิษสูงสุดที่สามารถดูดซับได้
C_{out}	ความเข้มข้นของสารมลพิษออกจากระบบ
EBRT	เวลากักพัก (Empty Bed Residence Time)
EC	ความสามารถในการกำจัด
ECmax	ความสามารถในการกำจัดสูงสุด (Maximum Elimination Capacity)
H	ค่าคงที่ของเฮนรี่
k	อัตราการย่อยสลายทางชีวภาพ
K_f	ค่าสัมประสิทธิ์ดูดซับของ Freundlich
K_L	ค่าสัมประสิทธิ์ดูดซับของ Langmuir
k_{max}	อัตราการย่อยสลายทางชีวภาพสูงสุด
K_S	Half - Saturation Constant
k_t	ค่าคงที่อัตราการถ่ายเทมวล
n	ค่าสัมประสิทธิ์จากการทดลอง
Q_{air}	อัตราไหลของอากาศ
RE	ประสิทธิภาพการกำจัด
t	เวลา
V_f	ปริมาตรทั้งหมดของตัวกลาง
X	ความเข้มข้นของมวลชีวภาพ
μ	ค่าคงที่อัตราการเติบโตจำเพาะ
μ_{max}	ค่าคงที่อัตราการเติบโตจำเพาะสูงสุด
CC	Compost Control Set
TC_1	Treatment Compost Set 1
TC_2	Treatment Compost Set 2
MC	Manure Control Set
TM_1	Treatment Manure Set 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์ (ต่อ)

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
TM_2	Treatment Manure Set 2
CMC	Compost and Manure Control Set
TCM_1	Treatment Compost and Manure Set 1
TCM_2	Treatment Compost and Manure Set 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการใช้เครื่องจักรกลการเกษตรมีบทบาทสำคัญอย่างมากสำหรับการใช้งานในภาคเกษตรกรรมของประเทศไทย และการขยายตัวของอุตสาหกรรมการเกษตรส่งผลให้เกษตรกรนิยมเลือกใช้เครื่องจักรกลการเกษตรมากขึ้น ซึ่งสามารถช่วยทุ่นแรง เพิ่มคุณภาพ และเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร จึงตามมาด้วยการผลิตเครื่องจักรกลการเกษตรที่เพิ่มมากยิ่งขึ้น

ในกระบวนการผลิตเครื่องจักรกลการเกษตรมีขั้นตอนการพ่นสีเคลือบชิ้นงาน และการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ต่างๆก่อนนำไปประกอบ ส่งผลให้น้ำเสียที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนเหล่านี้มีการระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds, VOCs) ออกมาสู่สิ่งแวดล้อม แม้ว่าสารอินทรีย์ระเหยง่ายไม่ถูกจัดอยู่ในกลุ่มสารเคมีที่มีพิษรุนแรง แต่การปล่อยสารอินทรีย์ระเหยง่ายออกสู่บรรยากาศเป็นสิ่งที่โรงงานต้องมีการควบคุม เนื่องจากการปล่อยสารอินทรีย์ระเหยง่ายจำนวนมากส่งผลต่อระดับชั้นโอโซนของโลก นอกจากนี้เมื่อเข้าสู่ร่างกายยังส่งผลทำให้เกิดปัญหาทางสุขภาพ ดังนั้นบริษัทผลิตเครื่องจักรกลการเกษตรจำเป็นต้องมีการควบคุม และลดการแพร่กระจายของสารอินทรีย์ระเหยง่าย เพื่อลดไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่ายจากน้ำเสียที่ผ่านจากกระบวนการพ่นสี

ดังนั้นสหกิจศึกษาครั้งนี้จึงเป็นการศึกษาการบำบัดอากาศจากบริษัทเครื่องจักรกลการเกษตรที่มีสารอินทรีย์ระเหยง่าย โดยศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศด้วยเครื่องกรองชีวภาพ ศึกษาวัสดุตัวกลางที่เหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย ศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องกรองชีวภาพ และศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายของเครื่องกรองชีวภาพ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1) เพื่อศึกษาตัวกลางที่เหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย
2) เพื่อศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องกรองชีวภาพ
3) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศโดยเครื่องกรองชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1) ศึกษาความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายโดยเวลากักพัก 60 วินาทีและความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่ายเท่ากับ 1.2, 2.0, 4.0 ส่วนในล้านส่วน โดยเครื่องกรองชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการใช้หลักการ Fluidized Bed Drier
2) ตัวกลางที่ใช้ในการทดลองในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยถ่านกัมมันต์, ไบโอมีเดีย, ปุ๋ยหมัก, ปุ๋ยมูลไก่ และกาบมะพร้าว
3) ศึกษาคุณสมบัติของตัวกลางที่เลือกใช้โดยศึกษา ค่าความเป็นกรด - ด่าง ความชื้นในวัสดุตัวกลาง ความหนาแน่น ความพรุน ปริมาณอินทรียวัตถุ ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน และปริมาณธาตุอาหารของวัสดุตัวกลางเฉพาะปุ๋ยหมัก และปุ๋ยมูลไก่
4) ทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องกรองชีวภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย โดยใช้เครื่อง Multi – Gas Monitors USA. ยี่ห้อ mPower (Model : POLI MP400P with Pump) Measuriment Gas : VOCs) และเครื่องXiaomi Mijia Air Detector
5) สรุปผลการทดลองถึงประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยเครื่องกรองชีวภาพ ความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย และค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) ทราบถึงวิธีดำเนินงาน และการควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อเครื่องกรองชีวภาพเพื่อควบคุมและดำเนินการได้อย่างเหมาะสม
2) เพื่อเป็นแนวทางเบื้องต้นในการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพ
3) เพื่อนำไปประยุกต์ในการลดการแพร่กระจายของสารอินทรีย์ระเหยง่ายสู่สิ่งแวดล้อม
4) เพื่อนำวัสดุธรรมชาติมาใช้ประโยชน์เป็นวัสดุตัวกลางในเครื่องกรองชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาเรื่องการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพ ผู้ศึกษาได้รวบรวมแนวคิด ทฤษฎี และวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐาน และแนวทางในการศึกษาโดยแบ่งออกเป็นหัวข้อต่าง ๆ ดังนี้

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับสารอินทรีย์ระเหยง่าย (ความหมาย, ชนิด, คุณสมบัติทั่วไป, แหล่งที่มาของสารอินทรีย์ระเหยง่าย)

2.2 การบำบัดทางชีวภาพ

2.3 กลไกของเครื่องกรองชีวภาพ

2.4 ประเภทของจุลินทรีย์ที่ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย

2.5 หลักการในการเลือกตัวกลางที่เหมาะสม

2.6 ประเภทของตัวกลางในเครื่องกรองชีวภาพ

2.7 พารามิเตอร์ในการควบคุมและการออกแบบระบบ

2.8 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs)

2.1.1 ความหมายของสารอินทรีย์ระเหยง่าย/สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย

หน่วยงาน US - EPA (United States Environmental Protection Agency) นิยามว่า VOCs - Volatile Organic Compounds คือสารประกอบคาร์บอนใด ๆ ยกเว้น คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2), กรดคาร์บอนิก (Carbonic Acid) โลหะคาร์ไบด์หรือคาร์บอเนต (Metallic Carbides or Carbonates) และแอมโมเนียมคาร์บอเนต [$(NH_4)_2CO_3$] ซึ่งมีส่วนร่วมในปฏิกิริยาเคมีแสง (Photochemical Reaction) ในบรรยากาศ รวมถึงสารประกอบดังต่อไปนี้ซึ่งได้รับการพิจารณาแล้วว่ามีปฏิกิริยาเคมีแสงเล็กน้อย มีเทน, อีแทน และอื่น ๆ (United States Environmental Protection Agency, 2019)

กระทรวงอุตสาหกรรมได้ให้นิยามของสารอินทรีย์ระเหยง่ายว่า“สารอินทรีย์ระเหยหรือสารอินทรีย์ระเหยง่าย” เรียกทับศัพท์ว่า วีโอซี (VOCs-Volatile Organic Compounds) คือสารประกอบที่มีคาร์บอนอินทรีย์ (Organic Carbon) เป็นองค์ประกอบหลัก และมีความดันไอมากกว่า 0.1 มิลลิเมตรปรอท ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และความดัน 760 มิลลิเมตรปรอท ยกเว้น มีเทน คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ โลหะคาร์ไบด์ หรือคาร์บอเนต แอมโมเนียมคาร์บอเนต (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2012)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 ชนิด คุณสมบัติทั่วไป และแหล่งที่มาของสารอินทรีย์ระเหยง่าย

กองความปลอดภัยแรงงาน กรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน จำแนกสารอินทรีย์ระเหยง่ายออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

1. กลุ่มไฮโดรคาร์บอนระเหยที่ไม่มีอะตอมของธาตุคลอรีนในโมเลกุล (Non - Chlorinated VOCs หรือ Non - Halogenated Hydrocarbons) สารกลุ่มนี้มาจากสิ่งแวดล้อม การเผาไหม้กองขยะ พลาสติก วัสดุ สารตัวทำละลาย สีทาวัสดุ ซึ่งทำให้มีผลเสียต่อสุขภาพของผู้ได้รับ คือทำให้ผู้ป่วยเป็นโรคทางเดินหายใจ

2. กลุ่ม Chlorinated VOCs หรือ Halogenated Hydrocarbons ได้แก่ กลุ่มไฮโดรคาร์บอนระเหยที่มีอะตอมของคลอรีนในโมเลกุล ได้แก่ สารเคมีที่ใช้สังเคราะห์ในอุตสาหกรรม สารกลุ่มนี้มีความเป็นพิษมากกว่า และเสถียรในสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารในกลุ่มสาร Non - Chlorinated VOCs นั่นคือสลายตัวได้ยากในธรรมชาติ และในทางเคมีจะมีความคงตัวสูง สะสมได้นาน รบกวนการทำงานของสารพันธุกรรม ยับยั้งปฏิกิริยาชีวเคมีในเซลล์ มีฤทธิ์ในการก่อมะเร็ง หรือกระตุ้นการเกิดมะเร็งได้

ตารางที่ 2.1 การจำแนกสารอินทรีย์ระเหยง่ายตามลักษณะโมเลกุลของสาร

Non - Chlorinated VOCs	กลุ่มสารอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน (Aliphatic Hydrocarbon) หมายถึงสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ภายในโมเลกุลมีอะตอมของคาร์บอนต่อกันเป็นโซ่ในปลายเปิด ซึ่งอาจเป็นโซ่ตรงหรือโซ่ที่มีกิ่งก้านสาขา เช่น น้ำมันเชื้อเพลิง (Fuel Oil), ตัวทำละลายที่ใช้ในอุตสาหกรรม (Industrial Solvents), โพนเพน (Propane), 1,3-บิวตะไดอีน, น้ำมันเบนซิน (Gasoline), เฮกเซน (Hexane) เป็นต้น
	กลุ่มอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Aromatic Hydrocarbon) มีโครงสร้างทางเคมีที่อะตอมของธาตุคาร์บอนต่อกันเป็นวงแหวนเบนซีน (Benzene Ring) เช่น โทลูอีน (Toluene), ไซลีน (Xylene), เบนซีน (Benzene), แนฟทาลีน (Naphthalene), สไตรีน (Styene), ฟีนอล (Phenol) เป็นต้น
	กลุ่มแอลกอฮอล์ (Alcohols) เช่น เมทธิลแอลกอฮอล์ (Methyl Alcohol) เป็นต้น
	กลุ่มคีโตน (Ketones) เช่น อะซีโตน, เมทธิลเอทธิลคีโตน (MEK), เมทธิลไอโซบิวทิลคีโตน (MIBK) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 (ต่อ) การจำแนกสารอินทรีย์ระเหยง่ายตามลักษณะโมเลกุลของสาร

Halogenated VOCs	ฮาโลจิเนเตท วีโอซี (Halogenated VOCs) คือกลุ่มสารไฮโดรคาร์บอนระเหยง่ายที่มีอะตอมของธาตุคลอรีนหรือฮาโลเจน เช่น 1,1,1,2 - Tetrachloroethane Bromoform Glycerol trichlorohydrin 1,1,1 - Trichloroethane Bromomethane Hexachlorobutadiene 1,1,2,2, - Tetrachloroethane

ที่มา: กองความปลอดภัยแรงงาน กรมสวัสดิการคุ้มครองแรงงาน, 2019

2.1.3 แหล่งที่มาของสารอินทรีย์ระเหยง่าย

สารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศจัดเป็นมลพิษซึ่งในชีวิตประจำวันมีผลิตภัณฑ์หลายอย่างที่มีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ระเหยง่าย สารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศเกิดจากการเผาไหม้ของน้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ รวมทั้งเกิดจากการปล่อยออกมาจากการประกอบกิจการของภาคอุตสาหกรรมที่ใช้ตัวทำละลายที่มีสารอินทรีย์ระเหยง่ายเป็นองค์ประกอบ ซึ่งการปล่อยสารอินทรีย์ระเหยง่ายจากโรงงานอุตสาหกรรมนั้นอาจส่งผลต่อสุขภาพอนามัยของประชาชนได้ แหล่งกำเนิดสารอินทรีย์ระเหยง่ายแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามลักษณะการเกิด คือ

2.1.3.1 แหล่งกำเนิดตามธรรมชาติ (Natural Sources) เป็นแหล่งกำเนิดสารอินทรีย์ระเหยง่ายจากกระบวนการทางธรรมชาติ เช่น

ไฟป่าเป็นการเกิดขึ้นในธรรมชาติ ซึ่งเกิดจากการที่อากาศในบรรยากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้น และการเสียดสีของต้นไม้ใบหญ้า สารมลพิษที่ปล่อยออกมาจากการเกิดไฟป่า ได้แก่ ควัน เถ้า และแก๊สต่าง ๆ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ ออกไซด์ของไนโตรเจน ไฮโดรคาร์บอน ออกไซด์ของซัลเฟอร์ เป็นต้น

ภูเขาไฟระเบิด เมื่อเกิดการระเบิดของภูเขาไฟจะมีเถ้าถ่าน ควัน ฝุ่นละอองฟุ้งกระจายออกสู่บรรยากาศเป็นจำนวนมาก

ต้นไม้ประเภทผลัดใบ (Deciduous Trees) จะปล่อยสารระเหยอินทรีย์พวก Isoprene ที่เป็นส่วนประกอบสำคัญของน้ำมันหอมระเหย และยางไม้ รวมทั้งสารอินทรีย์อื่นที่ต้นไม้ใช้ล่อแมลงให้มาผสมเกสรหรือใช้สำหรับไล่แมลงหรือสัตว์บางชนิด สารอินทรีย์ต่าง ๆ ที่ต้นไม้สังเคราะห์สามารถรวมตัวกับไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) กลายเป็นโอโซนที่เป็นตัวการทำให้เกิดหมอกควันได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำ ดัดแปลง เผยแพร่ หรือนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้นำไฟล์นี้ไปเผยแพร่ต่อในทุกรูปแบบ ทั้งที่มีการนำไปใช้

การย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียในสภาวะไร้อากาศ (ไร้ออกซิเจน) ผลที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายส่วนใหญ่ คือ ก๊าซชีวภาพ ซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นก๊าซมีเทน ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศหรือไร้ออกซิเจน สารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน จะถูกย่อยสลายโดยเอนไซม์ที่แบคทีเรียชนิดสร้างกรดหลั่งออกมานอกเซลล์ ผลที่ได้จะทำให้สารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ถูกย่อยสลายกลายเป็นสารอินทรีย์โมเลกุลเล็ก เช่น น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว กรดอะมิโน และกรดไขมัน เป็นต้น หลังจากนั้นสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กจะถูกแบคทีเรียดังกล่าวดูดซึมเข้าสู่เซลล์ และหลั่งเอนไซม์เพื่อย่อยสลาย สารอินทรีย์ภายในเซลล์ให้กลายเป็นกรดอะซิติก และก๊าซไฮโดรเจนขับออกมานอกเซลล์จากนั้นแบคทีเรียชนิดสร้างมีเทนจะย่อยสลายเปลี่ยนกรดอะซิติก และไฮโดรเจนให้เป็นก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งก๊าซต่างๆที่เกิดขึ้นจะลอยตัวขึ้นเหนือผิวน้ำ และกระจายสู่บรรยากาศ

2.1.3.2 แหล่งกำเนิดจากกิจกรรมของมนุษย์ (Anthropogenic Sources) เป็นแหล่งที่ปล่อยสารอินทรีย์จากกิจกรรมของมนุษย์ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ได้แก่

การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับยานพาหนะ การระเหยของน้ำมันเชื้อเพลิงจากปั๊มน้ำมันหรือในขณะถ่ายน้ำมัน สารอินทรีย์ระเหยง่ายเป็นสารประกอบที่พบได้ในน้ำมันเชื้อเพลิง และก๊าซธรรมชาติ ซึ่งจะถูกปลดปล่อยออกมาสู่บรรยากาศได้ในระหว่างการใช้หรือจ่าย หรือจัดเก็บน้ำมันเชื้อเพลิง และก๊าซธรรมชาติ นอกจากนี้หากมีการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ไม่สมบูรณ์ อาจก่อให้เกิดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในรูปอื่นได้ และสามารถปนเปื้อนในอากาศได้มาก

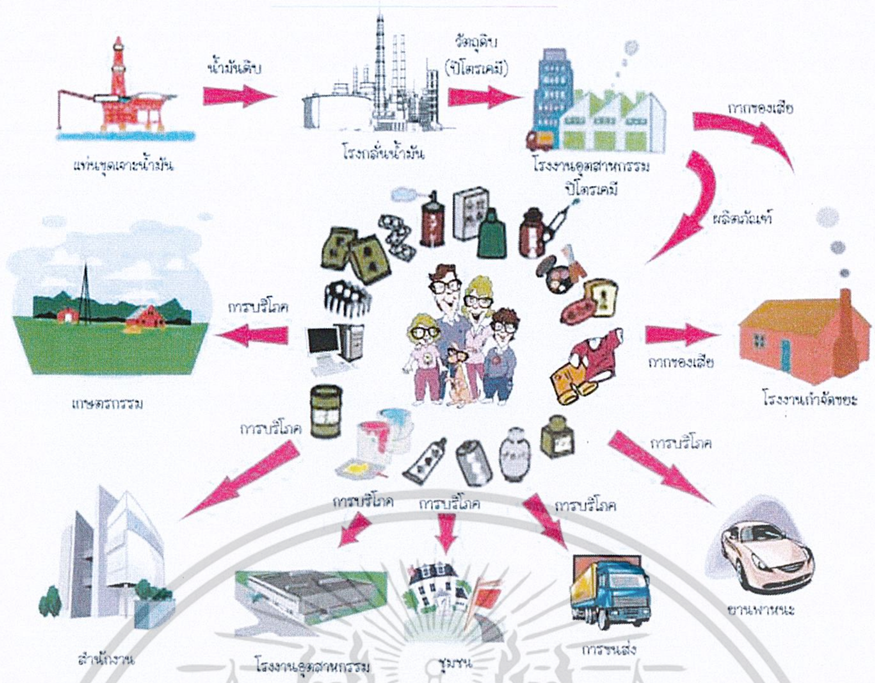
การใช้สารทำละลายในโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น โรงงานกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์จากปิโตรเลียม โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับเคมีภัณฑ์ สารเคมีหรือวัสดุเคมี โรงงานผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น

ตลอดจนการกำจัดกากของเสีย เช่น การเผาขยะ บำบัดน้ำเสีย และจากหลุมฝังกลบ การใช้ผลิตภัณฑ์ตามอาคาร และบ้านเรือน เช่น สี กาว และการใช้ยาฆ่าแมลง เป็นต้น ถ้าพิจารณาแหล่งกำเนิดสารอินทรีย์ระเหยง่ายจากกิจกรรมของมนุษย์แล้ว อาจแยกประเภทตามลักษณะของแหล่งกำเนิดสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Kantikwang, 2012) โดยแบ่งออกเป็น แหล่งกำเนิดประเภทเคลื่อนที่ได้ และแหล่งกำเนิดไม่เคลื่อนที่

1) แหล่งกำเนิดประเภทเคลื่อนที่ได้ (Mobile Source) หมายถึง ยานพาหนะประเภทต่าง ๆ ที่มีการใช้เชื้อเพลิง เช่น รถยนต์ จักรยานยนต์ เครื่องบิน รถไฟ เรือ เป็นต้น

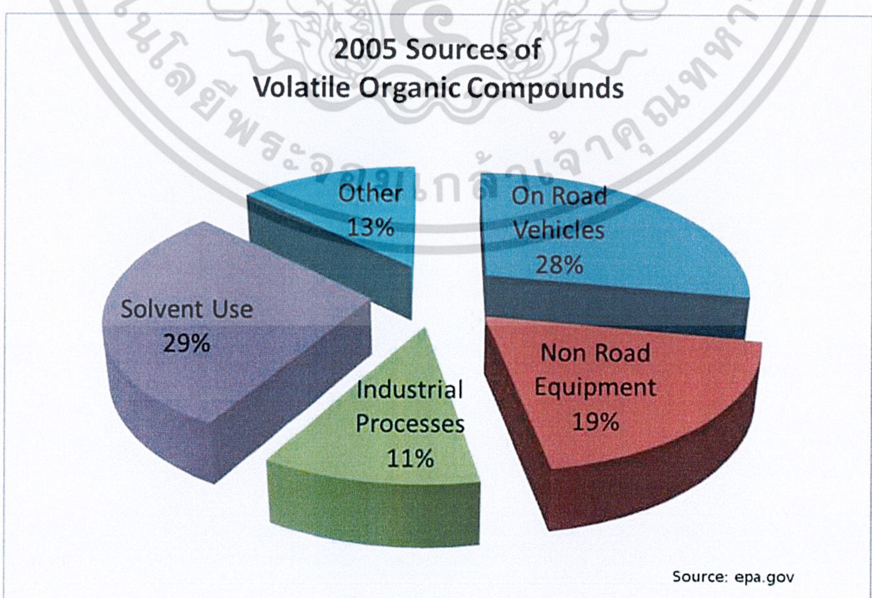
2) แหล่งกำเนิดไม่เคลื่อนที่ (Stationary Source) หมายถึง การปล่อยสารมลพิษอากาศ จากแหล่งกำเนิดที่อยู่กับที่ เช่น โรงงานอุตสาหกรรม สถานีบริการน้ำมัน ถังเก็บน้ำมัน ถังเก็บสารระเหยอื่น ๆ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 แหล่งที่มาของสารอินทรีย์ระเหยง่ายจากกิจกรรมของมนุษย์
ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ, 2554

นอกจากนี้ในประเทศสหรัฐอเมริกาหน่วยงาน US - EPA (2005) ได้รายงานว่าแหล่งที่มาของสาร VOCs สูงสุด 3 ลำดับแรกมาจากการใช้สารเป็นตัวทำละลายร้อยละ 29 จากยานพาหนะร้อยละ 28 และจากกระบวนการทางอุตสาหกรรม ร้อยละ 11 ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แหล่งกำเนิดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในสหรัฐอเมริกา ปี ค.ศ. 2005
ที่มา: Daniel.Cardenas, 2010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การบำบัดทางชีวภาพ

ระบบกรองชีวภาพเป็นระบบการบำบัดมลพิษทางอากาศจากแหล่งกำเนิดที่สามารถกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยกระบวนการเมตาบอลิซึมของจุลินทรีย์ในการบำบัดอากาศ การบำบัดทางชีวภาพเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ และประหยัดสำหรับการกำจัดสารปนเปื้อนที่มีความเข้มข้นต่ำที่ปนเปื้อนในอากาศเป็นปริมาณมาก สารปนเปื้อนจะถูกดูดซับจากก๊าซไปยังเฟสของเหลวโดยกระบวนการของจุลินทรีย์ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน และปฏิกิริยารีดักชัน สารปนเปื้อนจะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และมวลชีวภาพ (Biomass) มลพิษในอากาศอาจเป็นได้ทั้งไอระเหยของสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ที่ถูกใช้เป็นแหล่งพลังงาน และเป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับการเจริญเติบโตของประชากรจุลินทรีย์ โดยทั่วไปจุลินทรีย์ที่ใช้ในการบำบัดทางชีวภาพเป็นสิ่งมีชีวิตที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ประชากรจุลินทรีย์เหล่านี้อาจเป็นสายพันธุ์เดียวกันกับชนิดใดชนิดหนึ่งหรืออาจมีปฏิสัมพันธ์กับสปีชีส์หลายชนิดเพื่อกำจัดสารปนเปื้อน จุลินทรีย์ภายในระบบอาจมีความสัมพันธ์กันเชิงระบบนิเวศหลายอย่าง เช่น ผู้ล่า, ปรสิต และอื่น ๆ ซึ่งเป็นเรื่องปกติของจุลินทรีย์ แต่ความสัมพันธ์ดังกล่าวมีความจำเป็นในการสร้างสมดุลของภายในของระบบ

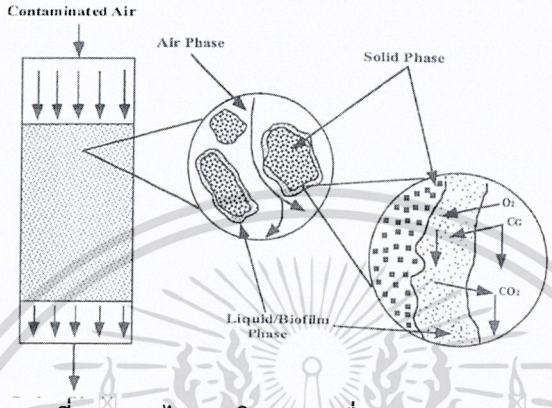
สิ่งปนเปื้อนที่สนใจต้องสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ และไม่ก่อให้เกิดของเสียที่เป็นพิษ การบำบัดสารปนเปื้อนทางชีวภาพในอากาศต้องเป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้สูงพร้อมมีโครงสร้างพันธะที่ไม่ซับซ้อน (Simple Bond Structures) สารประกอบที่มีโครงสร้างซับซ้อน (Complex Bond Structures) ต้องใช้พลังงานมากในการย่อยสลาย และพลังงานนี้ไม่สามารถถูกสร้างได้โดยจุลินทรีย์ ดังนั้นจึงมีการย่อยสลายทางชีวภาพของสารประเภทนี้น้อยมากหรืออาจไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้

ถังปฏิกิริยาที่ใช้ในการบำบัดทางชีวภาพ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ เครื่องกรองชีวภาพ (Biofilter) เครื่องโปรยกรองทางชีวภาพ (Biotricking Filters) และเครื่องดักจับทางชีวภาพ (Bioscrubbers) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เครื่องกรองชีวภาพ (Biofilter) เป็นการใช้จุลินทรีย์ที่ยึดเกาะกับวัสดุตัวกลางที่มีความพรุนเพื่อทำการย่อยสลายสารมลพิษที่มีอยู่ในอากาศ จุลินทรีย์เหล่านี้จะเจริญเติบโตอยู่ในฟิล์มชีวภาพ (Biofilm) ที่อยู่บนพื้นผิวของวัสดุตัวกลางหรือแขวนลอยอยู่ในเฟสของเหลวที่ล้อมรอบตัวกลางดังแสดงในรูปที่ 2.3 วัสดุตัวกลางประกอบด้วยวัสดุเฉื่อย เช่น ปุ๋ยหมัก พีท และอื่น ๆ ซึ่งต้องมีพื้นที่ผิวมากพอเพื่อให้จุลินทรีย์ยึดติดกับวัสดุตัวกลาง และเป็นแหล่งอาหารสำหรับจุลินทรีย์ เมื่ออากาศไหลผ่านวัสดุตัวกลางสารปนเปื้อนในเฟสอากาศจะถูกดูดซับเข้าไปในฟิล์มชีวภาพ (Biofilm) และวัสดุตัวกลาง โดยสารปนเปื้อนจะถูกย่อยสลายทางชีวภาพดังแสดงในรูปที่ 2.4 จุลินทรีย์จะใช้สารมลพิษเพื่อใช้ในการเจริญเติบโตและการสร้างเซลล์ใหม่ ภายในเครื่องกรองชีวภาพจะมีกลไกร่วมกันซึ่งประกอบด้วยการดูดซึม (Absorption) การดูดซับ (Adsorption) การย่อยสลายทางชีวภาพ (Degradation) และการคายสารออก (Desorption) ของก๊าซมลพิษ และอาจต้องมีการเติมน้ำ และธาตุอาหารเป็นครั้งคราวเพื่อรักษาความชื้น และปริมาณสารอาหารในเครื่องกรองชีวภาพ เครื่องกรอง

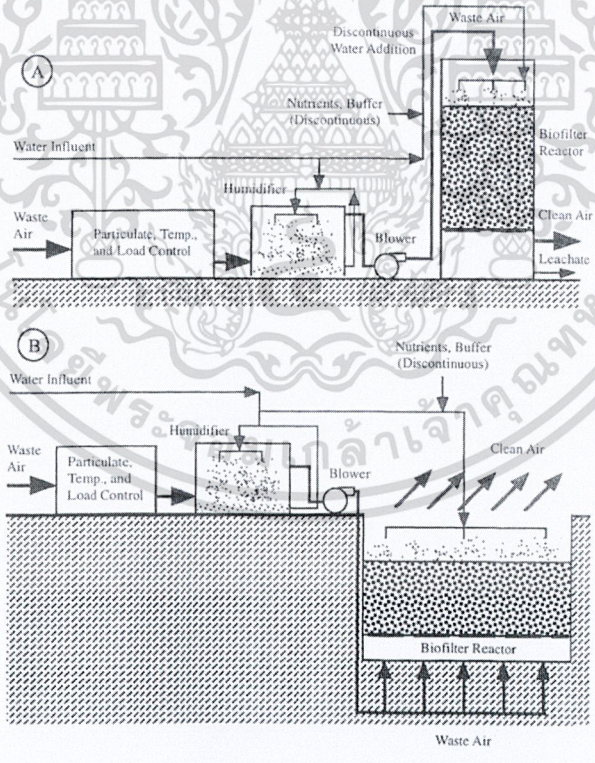
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชีวภาพที่มีประสิทธิภาพนั้น ต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติของตัวกลางที่เลือกใช้ ซึ่งประกอบด้วย ความพรุน ระดับการอัดตัว ความสามารถการเก็บกักน้ำ และความสามารถในการอยู่อาศัยของกลุ่มจุลชีพ พารามิเตอร์ที่ต้องควบคุมประกอบด้วยความเป็นกรด – ด่างของตัวกลาง อุณหภูมิ ปริมาณความชื้น และธาตุอาหาร เป็นต้น



รูปที่ 2.3 กลไกภายในของเครื่องกรองชีวภาพ

ที่มา: Devinny et al., 1999



รูปที่ 2.4 แผนผังไดอะแกรมของเครื่องกรองชีวภาพ

(A) เครื่องกรองชีวภาพปิดเหนือพื้นดิน (B) เครื่องกรองชีวภาพแบบเปิดพื้นดิน

ที่มา: Devinny et al., 1999

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลไกการทำงานของถังปฏิกิริยาเหล่านี้จะมีการทำงานที่คล้ายกัน แต่ต่างกันที่สถานะของจุลชีพ และน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ลักษณะของถังปฏิกิริยาชีวภาพชนิดต่าง ๆ (Devinny et al., 1999)

Reactor Type	Microorganisms	Water Phase
Biofilter	Fixed	Stationary
Biotrickling	Fixed	Flowing
Bioscrubber	Suspended	Flowing

2.3 กลไกของเครื่องกรองชีวภาพ

2.3.1 การถ่ายเทก๊าซ (Gas Transfer)

2.3.1.1 สมดุลของก๊าซ (The Equilibrium of Gas) การถ่ายเทมวลจากอากาศไปยังน้ำ (Water Phase) ที่สภาวะสมดุลการแยกตัวของสารจากน้ำไปยังอากาศ อธิบายโดยอาศัยกฎของเฮนรี่ (Henry's Law) กล่าวว่า ความเข้มข้นของสารในอากาศเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารในน้ำ ดังแสดงในสมการที่ 2.1

$$C_G = H \times C_L \qquad 2.1$$

โดยที่ C_G = ความเข้มข้นของสารในอากาศ

H = ค่าคงที่ของเฮนรี่

C_L = ความเข้มข้นของสารในน้ำ

2.3.1.2 อัตราการถ่ายเทก๊าซ (Gas Transfer Rate)

การถ่ายเทมวลจากอากาศไปยังน้ำ เป็นวัตถุประสงค์หลักของการกรองทางชีวภาพ หากอัตราการถ่ายเทมวลของสารมลพิษสูงยอมให้อากาศไหลผ่านถังปฏิกิริยาเร็วขึ้นส่งผลให้ระบบการกรองทางชีวภาพมีความคุ้มค่าด้านเศรษฐศาสตร์ การถ่ายเทมวลจากอากาศไปยังน้ำ เป็นไปตามทฤษฎีสองฟิล์ม (Two - Film Theory) อัตราการถ่ายเทมวลสามารถคำนวณได้โดยความเข้มข้นของสารในสภาวะของเหลวหรือก๊าซ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลดังแสดงในสมการที่ 2.2

$$\frac{dC_L}{dt} = k_t[C_L^* - C_L] = k_t[\frac{C_G}{H} - C_L] \qquad 2.2$$

โดยที่ C_G = ความเข้มข้นของสารในอากาศ

C_L = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนที่เหลืออยู่ในสารละลาย ณ สภาวะสมดุล

C_L^* = ความเข้มข้นของสารที่สมดุลกับความเข้มข้นของอากาศบริเวณนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

H = ค่าคงที่ของเฮนรี่

k_t = ค่าคงที่อัตราการถ่ายเทมวล

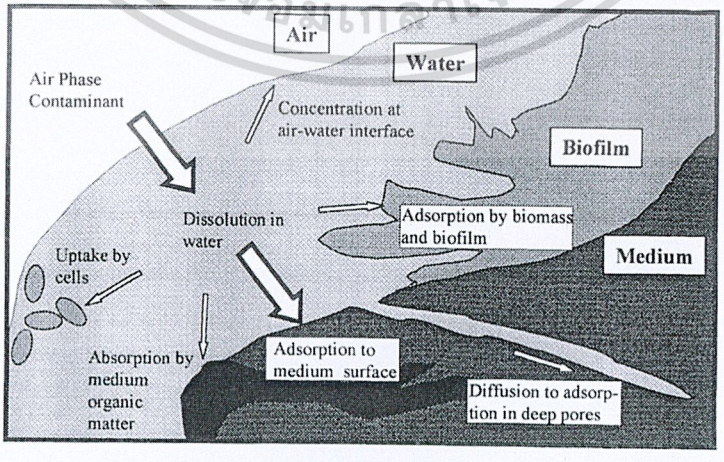
กลไกการถ่ายเทก๊าซเกิดขึ้นในกระบวนการที่สารมลพิษในอากาศแพร่ลงสู่ฟิล์มชีวภาพซึ่งอัตราการถ่ายเทก๊าซขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารมลพิษ และค่าคงที่อัตราการถ่ายเทมวล

2.3.2 น้ำ (The Water Phase)

ในการกรองทางชีวภาพมีสมมติฐานว่าน้ำอยู่ในสภาวะอยู่กับที่ (Stationary) ซึ่งอาจมีการไหลของน้ำลงด้านล่างของถังปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการควบแน่นหรือการเติมน้ำ (Irrigation) มากเกินไป แต่การไหลจะเป็นไปอย่างช้า ๆ โดยปกติผู้ควบคุมระบบจะมีการลดการไหลของน้ำเพื่อไม่ให้เกิดน้ำชะ (Leachate) การเคลื่อนที่ของน้ำเป็นการไหลแบบราบเรียบมากกว่าการไหลแบบปั่นป่วน ดังนั้น การแพร่จึงเป็นกลไกหลักในการถ่ายเทมวลไปสู่น้ำ การย่อยสลายทางชีวภาพ และการดูดซับสารมลพิษในน้ำ หรือในฟิล์มชีวภาพจะเกิดขึ้นที่ผิวของตัวกลางคล้ายกับการซึม สารมลพิษจะแพร่ไปยังตัวกลางและปล่อยผลิตภัณฑ์ที่เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพออกมา ผลิตภัณฑ์ดังกล่าวจะมีความดันไอสูงจึงถ่ายเทไปสู่อากาศ การแพร่ของสารมลพิษเข้าสู่ฟิล์มชีวภาพ โดยปกติแล้วจะช้ากว่าการแพร่ในอากาศ เนื่องจากความต้านทานการถ่ายเทมวลของน้ำ โดยที่ส่วนด้านล่างของชั้นฟิล์มชีวภาพจะมีความเข้มข้นของสารมลพิษลดน้อยลง และอาจไม่มีออกซิเจนเหลืออยู่ น้ำเป็นสิ่งสำคัญโดยเป็นที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์ และสารมลพิษจะแพร่สู่น้ำ และถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์หรือดูดซับต่อไป

2.3.3 การดูดซับสารมลพิษ (Adsorbed Contaminants)

เมื่อโมเลกุลของสารมลพิษละลายน้ำจะเกิดปรากฏการณ์ดังต่อไปนี้ การดูดซับไว้บนผิวของตัวกลาง ดูดซับไว้บนผิวของสารอินทรีย์ในฟิล์มชีวภาพ และดูดซับไว้ภายในสารอินทรีย์ในฟิล์มชีวภาพหรือตัวกลางหรือการสะสมที่ผิวน้ำ จุลินทรีย์ในฟิล์มชีวภาพนำสารมลพิษไปใช้ประโยชน์ต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การดูดซับภายในเครื่องกรองชีวภาพ

ที่มา: Devinny et al., 1999

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การดูดซับบนตัวกลางอธิบายตาม Freundlich Model ซึ่งตั้งอยู่บนสมมติฐานว่า พื้นที่สำหรับการดูดซับมีไม่จำกัด และปริมาณสารมลพิษที่ถูกดูดซับขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารมลพิษในน้ำ ดังแสดงในสมการที่ 2.3

$$C_{ads} = K_f C_L^{\frac{1}{n}} \qquad 2.3$$

โดยที่ C_{ads} = มวลของสารปนเปื้อนที่ถูกดูดซับต่อมวลของตัวดูดซับ

C_L = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนที่เหลืออยู่ในสารละลาย ณ สภาวะสมดุล

n = ค่าสัมประสิทธิ์จากการทดลอง

K_f = ค่าสัมประสิทธิ์ดูดซับของ Freundlich

การดูดซับบนตัวกลางอธิบายตาม Langmuir Model ซึ่งตั้งอยู่บนสมมติฐานว่า ความเข้มข้นของสารมลพิษที่ถูกดูดซับจะสมดุลทางเคมีความเข้มข้นของสารมลพิษที่ละลายน้ำ และการดูดซับมีพื้นที่จำกัด ดังแสดงในสมการที่ 2.4

$$C_{ads} = \frac{C_{max} \times C_L}{K_L + C_L} \qquad 2.4$$

โดยที่ C_{ads} = มวลของสารปนเปื้อนที่ถูกดูดซับต่อมวลของตัวดูดซับ

C_L = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนที่เหลืออยู่ในสารละลาย ณ สภาวะสมดุล

C_{max} = ความเข้มข้นของสารมลพิษสูงสุดที่สามารถดูดซับได้

K_L = ค่าสัมประสิทธิ์ดูดซับของ Langmuir

2.3.4 การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation)

1) ฟิล์มชีวภาพ (Biofilm) คือมวลของจุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตบนผิวของตัวกลาง และทำการย่อยสลายสารมลพิษให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่เป็นอันตราย โดยกระบวนการเมตาบอลิซึมของจุลินทรีย์ ฟิล์มชีวภาพจะเป็นฟิล์มบางๆอยู่ระหว่างของแข็ง และก๊าซ การกรองทางชีวภาพจะมีประสิทธิภาพดีเมื่อฟิล์มชีวภาพมีความหนา 1 - 5 มิลลิเมตร

2) จลนศาสตร์ (Kinetics) คือพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับ การคำนวณอัตราการย่อยสลายสารมลพิษทางชีวภาพ และอัตราการเกิดของมวลชีวภาพ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการพิจารณาค่าทางจลนศาสตร์ คือ Michalis – Menten Equation ดังแสดงในสมการที่ 2.5

$$\frac{dC_L}{dt} = \frac{k_{max} C_L}{K_s + C_L} \qquad 2.5$$

โดยที่ C_L = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนที่เหลืออยู่ในสารละลาย ณ สภาวะสมดุล

k_{max} = อัตราการย่อยสลายทางชีวภาพสูงสุด

K_S = Half - Saturation Constant

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อความเข้มข้นของสารปนเปื้อนที่เหลืออยู่ในสารละลาย ณ สภาวะสมดุล (C_L) มากกว่าค่าคงที่การอิ่มตัว (K_s) มาก ๆ อัตราการย่อยสลายทางชีวภาพจะเท่ากับ อัตราการย่อยสลายทางชีวภาพสูงสุด (k_{max}) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาอันดับศูนย์ หมายถึงว่า อัตราการย่อยสลายไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารมลพิษ

เมื่อสารมลพิษมีความเข้มข้นต่ำปฏิกิริยาการย่อยสลายจะเป็นปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง โดยในการกรองทางชีวภาพบริเวณทางเข้าของก๊าซจะเป็นปฏิกิริยาอันดับศูนย์เนื่องจากมีความเข้มข้นสูง แต่เมื่อห่างออกไปจะเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเมื่อมีความเข้มข้นต่ำ

การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์พิจารณาได้ดังแสดงในสมการที่ 2.6

$$\frac{dX}{dt} = \mu X \qquad 2.6$$

โดยที่ X = ความเข้มข้นของมวลชีวภาพ

μ = ค่าคงที่อัตราการเติบโตจำเพาะ

การคำนวณหาค่าคงที่อัตราการเติบโตจำเพาะใช้ความสัมพันธ์ของ Monod ดังแสดงในสมการที่ 2.7

$$\mu = \frac{\mu_{max} C_L}{K_m + C_L} \qquad 2.7$$

μ_{max} = ค่าคงที่อัตราการเติบโตจำเพาะสูงสุด

μ = ค่าคงที่อัตราการเติบโตจำเพาะ

C_L = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนที่เหลืออยู่ในสารละลาย ณ สภาวะสมดุล

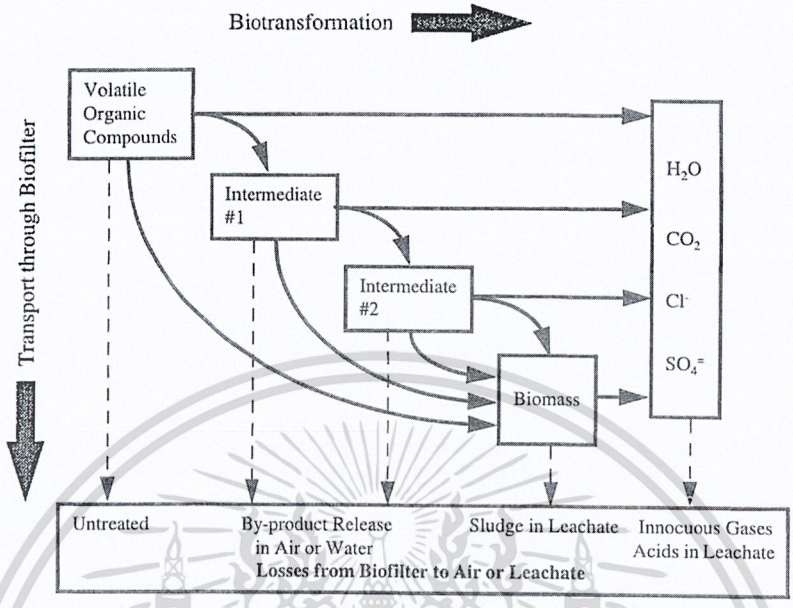
2.3.5 ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น (Product Generation)

อากาศปนเปื้อนสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ที่ไหลผ่านเครื่องกรองชีวภาพ จุลินทรีย์จะทำการย่อยสลายสารมลพิษให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ ซัลเฟต และไนเตรท ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสารมลพิษที่ต้องการบำบัดดังแสดงในรูปที่ 2.6 ในอีกทางหนึ่งสารประกอบอาจถูกเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์อันดับสองซึ่งจะถูกใช้โดยจุลินทรีย์ประเภทอื่นต่อไป สารประกอบที่มีโครงสร้างซับซ้อนหรือย่อยสลายยากจะถูกเปลี่ยนรูปเป็นสารใหม่โดยจุลินทรีย์ สารประกอบที่เกิดขึ้นใหม่นี้อาจระเหยไปกับอากาศเนื่องจากมีความดันไอสูง ขณะที่บางชนิดมีความทนทานต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ก็จะสะสมในเครื่องกรองชีวภาพหรือถูกน้ำชะทิ้งไป

การศึกษาการกรองทางชีวภาพของเอทานอลพบว่า กรณีที่มีการป้อนสารมลพิษให้ระบบในอัตราที่สูงอาจเป็นเหตุให้เกิดการสะสมของสารประกอบที่เกิดขึ้นใหม่กับมวลชีวภาพซึ่งเป็นสารประกอบที่เกิดขึ้นใหม่บางตัวมีสภาพเป็นกรดอะซิติก การสะสมของกรดอะซิติกทำให้ค่าพีเอชของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวกลางต่ำลง ส่งผลให้กระบวนการเมตาบอลิซึมช้าลง หากมีการสะสมมากๆจะทำให้เครื่องกรองชีวภาพเสียหายได้



รูปที่ 2.6 กระบวนการเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพและกระบวนถ่ายเทมวลสารในเครื่องกรองชีวภาพ
ที่มา: Devniny et al., 1999

2.3.6 พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้น (Heat Generation)

ปกติปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารประกอบอินทรีย์ ทำให้เกิดพลังงานความร้อนขึ้นขณะที่จุลินทรีย์ต้องการพลังงานในดำรงชีวิตซึ่งได้มาจากพลังงานทางเคมี ก่อให้เกิดพลังงานความร้อน สำหรับสารมลพิษบางชนิดปริมาณความร้อนมีความสำคัญมาก เช่น ปฏิกิริยาออกซิเดชันสมบูรณ์ของเอทานอล 1 กรัมต่ออากาศแห้ง 1 ลูกบาศก์เมตร สามารถทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นจาก 20 องศาเซลเซียส เป็น 38 องศาเซลเซียส

ในระบบสภาวะไม่คงที่ (Non Steady State) ก่อให้เกิดพลังงานความร้อน เนื่องจากการย่อยสลายทางชีวภาพส่งผลให้เครื่องกรองชีวภาพมีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งตัวกลางในเครื่องกรองชีวภาพทำหน้าที่ดูดซับพลังงานความร้อนไว้ สามารถประมาณค่าได้จากความร้อนจำเพาะ และอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady State) อุณหภูมิของตัวกลาง และถังปฏิกิริยาจะไม่เปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตามถ้าอุณหภูมิของระบบมีความแตกต่างกับอุณหภูมิภายนอกจะเกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างสิ่งแวดล้อมกับถังปฏิกิริยา

เครื่องกรองชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการสามารถป้องกันการถ่ายเทความร้อน โดยทำการหุ้มฉนวนกันความร้อน ส่วนถังปฏิกิริยาขนาดใหญ่มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับภายนอกต่อปริมาตรต่ำ การถ่ายเทความร้อนสู่ผนังถังปฏิกิริยาถือว่าน้อยมาก ความร้อนที่เกิดขึ้นมีผลให้ปริมาณน้ำในตัวกลางระเหยออก และอุณหภูมิของอากาศที่ออกจะสูงกว่าอากาศที่เข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อนของอากาศที่เกิดขึ้นสามารถคำนวณปริมาณพลังงานที่ถูกใช้ไปในการทำให้อากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้น ผลรวมของความร้อนที่ทำให้น้ำระเหยกับความร้อนที่ทำให้อากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้น คือปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการย่อยสลายทางชีวภาพ โดยความร้อนที่เกิดขึ้นสามารถเปรียบเทียบกับความร้อนจากการเผาไหม้ของสารมลพิษที่บำบัดเพื่อคำนวณปริมาณสารมลพิษที่ถูกย่อยสลายไป ดังนั้นสมดุลความร้อนสามารถคำนวณได้โดยไม่เกี่ยวข้องกับอัตราการเกิดของมวลชีวภาพ

2.4 ประเภทของจุลินทรีย์ที่ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย

สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ในบรรยากาศจัดเป็นอากาศพิษ (Toxic Air) ซึ่งเกิดจากแหล่งกำเนิดตามธรรมชาติ และแหล่งกำเนิดจากกิจกรรมของมนุษย์ โดยการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายแต่ละชนิดในเครื่องกรองชีวภาพจะมีจุลินทรีย์ที่เหมาะสมดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 จุลินทรีย์ในเครื่องกรองชีวภาพสำหรับกำจัด BTEX และ VOCs

Pollutant	Packing	Bacteria	Fungi	Reference
Toluene	Pine bark	*Corynebacterium jeikeium* A *Corynebacterium nitrilophilus* *Micrococcus luteus* *Pseudomonas mendocina* *Sphingobacterium thalphophilum* *Turicella otitidis*		Strauss et al.,2000
Benzene Toluene Phenol		*Pseudomonas putida*		Abuhamed et al., 2004
Toluene	Ceramic rings		*Paecilomyces variotii*	Aizpuru et al., 2005
Toluene	Perlite	*Pseudomonas sp.* *Bacillus sp.*	*Exophiala oligosperma*	Est´evez et al., 2005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 (ต่อ) จุลินทรีย์ในเครื่องกรองชีวภาพสำหรับกำจัด BTEX และ VOCs

Pollutant	Packing	Bacteria	Fungi	Reference
Toluene	Spherical ceramic	*Pseudomonas putida*		Park and Jung, 2006
Toluene	Coconut fiber Compost Peat Pine leaves		*Aureobasidium sp.* *Clonostachys sp.*	Maestre et al., 2007
BTEX	Perlite	*Exophiala spp.*		Mohammad et al.,2007
Gasoline Vapor	Fire clay	*Pseudomonas aeruginosa* *Pseudomonas putida* *Comamonas testosterone* *Burkholderia cepacia* *Chryseobacterium indologenes* *Sphingobacterium multivorum* *Rhodococcus sp.*	*Cladosporium sp.* *Penicillium sp.* *Aspergillus oryzae* *Haplosporangium sp.*	Paca et al., 2007
Styrene	Coconut coir	*Pseudomonas putida*		Das et al., 2008
BTEX	Vermiculite		*Paecilomyces variotii*	Garc´ıa-Pe˜na et al., 2008
Toluene	Ceramic particles	*Bacillus cereus*		Li et al., 2008

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 (ต่อ) จุลินทรีย์ในเครื่องกรองชีวภาพสำหรับกำจัด BTEX และ VOCs

Pollutant	Packing	Bacteria	Fungi	Reference
Toluene	Perlite Polyurethane foam		*Cladophialophora sp.*	Prenafeta-Bold´u et al., 2008
Toluene	Polyurethane	*Stenotrophomonas maltophilia*		Ryu et al., 2008
Toluene	Perlite		*Paecilomyces lilacinus*	Vigueras et al., 2008
Styrene	-Granular activated carbon.	*Pseudomonas putida* CO1 *Pseudomonas putida* CO4 *Bacillus cereus* CO6	*Penicillium sp.* *Aspergillus oryzae* *Halosporangium sp.*	Paca and Halecky, 2009
Styrene	-Perlite -Granular activated carbon	*Pseudomonas aeruginosa* *Pseudomonas putida* A[b] *Pseudomonas putida* B[b] *Chryseobacterium indologenes*	*Aspergillus oryzae* *Halosporangium sp.* *Aspergillus oryzae* *Penicillium sp.* *Aspergillus oryzae* *Penicillium sp.* *Halosporangium sp.*	Paca et al., 2009

ที่มา: Farzana Haqua, 2011

2.5 หลักเกณฑ์ในการเลือกตัวกลางที่เหมาะสม

2.5.1 ปริมาณธาตุอาหารอนินทรีย์

ธาตุอาหารอนินทรีย์ประกอบไปด้วยไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม เป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับกระบวนการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ โดยทั่วไปสารอาหารจะถูกปลดปล่อยออกมาอย่างช้าๆ หรือฉีดพ่นเป็นสารละลายลงในวัสดุตัวกลางในระหว่างการเตรียมวัสดุตัวกลาง แต่ใช้เพียงตอนเริ่มต้นของการเดินระบบเท่านั้น อย่างไรก็ตามในบางกรณีจะมีการเติมสารอาหารเข้ามาระหว่างการทำงานของเครื่องกรองชีวภาพ โดยทั่วไปสำหรับวัสดุตัวกลางที่ใช้ปุ๋ยหมักควรมีธาตุอาหารเริ่มต้นของ N P K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำ ดัดแปลง เผยแพร่ หรือนำไปใช้ในรูปแบบอื่นๆ ก่อนได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากผู้เขียนเอกสารนี้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วง 0.4, 0.15 และ 0.15 % (Devniny et al., 1999) โดยน้ำหนักแห้งถือว่าเพียงพอแล้วสำหรับการบรรจุวัสดุตัวกลาง

2.5.2 ปริมาณสารอินทรีย์

ในหลายกรณีเครื่องกรองชีวภาพจะมีการบำบัดมลพิษแบบไม่ต่อเนื่อง เนื่องจากการเปลี่ยนกระบวนการทำงานหรือการหยุดทำงานของระบบในช่วงสุดสัปดาห์ มวลชีวภาพ และสารอินทรีย์ที่ดูดซึมได้เป็นสิ่งที่จำเป็นในการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ในช่วงหยุดระบบ ปกติแล้ววัสดุตัวกลางประเภทปุ๋ยหมักจะมีปริมาณสารอินทรีย์มาก ดังนั้นวัสดุตัวกลางชนิดนี้จึงไม่ต้องมีการเติมมวลสารอินทรีย์เข้าไปในระบบอีกเมื่อหยุดการทำงานของระบบ

2.5.3 ลักษณะการดูดซับและความพรุน

การดูดซับสารมลพิษในเครื่องกรองชีวภาพที่มีประสิทธิภาพจะขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำ สารมลพิษที่ต้องการบำบัด และธรรมชาติของวัสดุตัวกลาง ส่วนใหญ่เครื่องกรองชีวภาพควรมีความพรุนของตัวกลางอยู่ในช่วง 40 – 80 % เพื่อให้มั่นใจว่ามีไหลการของอากาศแบบตามกัน (Plug Flow) และมีความดันลดที่ต่ำ โดยทั่วไปแล้วจะผสมตัวกลางกับวัสดุเสริมเพื่อเพิ่มความพรุน และเพื่อลดการทรุดตัวของวัสดุตัวกลาง (Bohn, 1992)

2.5.4 การยึดเกาะของแบคทีเรีย

วัสดุตัวกลางที่ใช้ในเครื่องกรองชีวภาพควรมีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการยึดเกาะของจุลินทรีย์ (Durham et al., 1994) ได้กล่าวว่าตัวกลางที่มีพื้นที่ผิวขรุขระ มีความพรุน และกักเก็บน้ำได้เป็นคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เป็นอย่างมาก พื้นผิวขรุขระเป็นคุณสมบัติที่ช่วยป้องกันจุลินทรีย์จากแรงเฉือยทางชลศาสตร์ (Hydraulic Shear) รูพรุนที่มีขนาดใหญ่จะเป็นที่อยู่ของจุลินทรีย์ในสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม และจุลินทรีย์เหล่านั้นจะเจริญเติบโตเมื่อมีสภาพแวดล้อมเหมาะสม สำหรับวัสดุตัวกลางที่เป็นวัสดุสังเคราะห์บางครั้งอาจมีการใช้สารเคมีทำการชะล้างเพื่อป้องกันการเจริญเติบโตของเมือกจุลินทรีย์ (Slime Growth) ที่เป็นสาเหตุทำให้ระบบเกิดการอุดตัน

2.5.5 คุณสมบัติทางกลศาสตร์

วัสดุที่ใช้เป็นตัวกลางของเครื่องกรองชีวภาพควรมีระยะการใช้งานได้นาน ไม่เกิดการอุดตันและหดตัว เนื่องจากการสลายตัวของวัสดุ โดยคุณสมบัติสำคัญที่เป็นตัวกำหนดความแข็งแรงของโครงสร้างตัวกลางของเครื่องกรองชีวภาพคือความหนาแน่นของวัสดุตัวกลาง กล่าวคือเมื่อวัสดุตัวกลางมีความหนาแน่นมากจะเป็นนัยสำคัญว่าวัสดุดังกล่าวจะมีโครงสร้างที่แข็งแรง ในทางกลับกันถ้าวัสดุมีความหนาแน่นน้อยจะแสดงให้เห็นว่าวัสดุนั้นไม่แข็งแรง ดังนั้นวัสดุตัวกลางที่แข็งแรงจึงสามารถสร้างเครื่องกรองชีวภาพที่มีความสูงมากๆได้ ด้วยเหตุนี้ถังปฏิกิริยาจึงมีปริมาตรมากขึ้น รวมทั้งสามารถก่อสร้างในพื้นที่จำกัดได้จึงเป็นผลทำให้ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารนี้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปกติแล้ววัสดุตัวกลางประเภทปุ๋ยหมักที่เปียกจะมีความหนาแน่นอยู่ที่ประมาณ 300 - 500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร แต่มีการบีบอัดตัวง่าย และถูกบรรจุได้ประมาณ 1 – 1.5 เมตร วัสดุตัวกลางที่เป็นดินจะมีความหนาแน่นประมาณ 1,000 - 5,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร วัสดุอนินทรีย์อย่างเช่นถ่านกัมมันต์สามารถซ้อนทับกันได้ลึก และหากเป็นพลาสติกอาจเรียงกันได้ลึกถึง 5 เมตร

2.5.6 ค่าใช้จ่ายของวัสดุตัวกลาง อายุการใช้งาน และการจำกัดตัวกลางที่หมดอายุ

วัสดุตัวกลางที่ใช้ควรสามารถใช้งานได้อย่างน้อย 2 – 4 ปี ก่อนจะถึงเวลากำจัด และราคาค่าวัสดุตัวกลางควรจะน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายในด้านอื่น รวมถึงค่าใช้จ่ายในการดำเนินการควรจะต่ำ การเปลี่ยนตัวกลางใหม่เป็นสิ่งจำเป็นเมื่อประสิทธิภาพการกำจัดต่ำลงกว่าค่าที่ยอมรับได้ และเมื่อมีค่าความดันลดสูง สำหรับตัวกลางที่หมดอายุการใช้งานในเครื่องกรองชีวภาพไม่มีสภาพที่เป็นอันตราย สามารถกำจัดได้ง่าย และเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดน้อย เช่น การผสมกับดิน (Land Farming)

2.5.7 ปริมาณความชื้น (Moisture Content)

ปริมาณความชื้นเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่จะทำให้การเดินระบบประสบความสำเร็จได้ โดยทั่วไปก๊าซมลพิษที่เข้าระบบจะทำให้ชั้นตัวกลางของเครื่องกรองชีวภาพแห้ง ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของจุลินทรีย์ลดลงจึงต้องมีการเพิ่มความชื้นให้กับตัวกลาง ส่วนกรณีที่น้ำอยู่ในชั้นตัวกลางมากเกินไปจะทำให้เกิดเขตไร้อากาศ (Anaerobic Zone) ซึ่งจะทำให้เกิดกลิ่น และทำให้เกิดความดันลดมากขึ้น ปริมาณความชื้นในชั้นตัวกลางโดยทั่วไปแล้วจะอยู่ที่ระหว่าง 40-80 % (Devinny et al.,1999)

นอกจากนี้ควรมีการตรวจสอบความชื้นของวัสดุตัวกลางในเครื่องกรองชีวภาพเป็นระยะเพื่อป้องกันการแห้งของวัสดุตัวกลาง (Wang and Govind, 1997) การเพิ่มความชื้นให้ชั้นตัวกลางสามารถทำได้ 2 วิธี คือการเพิ่มความชื้นให้ก๊าซก่อนที่จะเข้าระบบ ปกติความชื้นของก๊าซควรมีค่าประมาณ 95% และอีกวิธีคือการเพิ่มความชื้นที่ผิวหน้าของชั้นตัวกลาง วิธีนี้อาจต้องระวังเรื่องน้ำชะ

2.6 ประเภทตัวกลางในเครื่องกรองชีวภาพ

2.6.1 ตัวกลางประเภทอินทรีย์

ตัวกลางประเภทอินทรีย์เป็นตัวกลางที่นิยมใช้ในเครื่องกรองชีวภาพ เนื่องจากเป็นวัสดุตัวกลางที่มีธาตุอาหาร มีประชากรจุลินทรีย์เป็นจำนวนมาก สามารถหาได้ง่าย และสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ ตัวอย่างตัวกลางประเภทอินทรีย์ ได้แก่

ก.) ปุ๋ยหมัก

ปุ๋ยหมักมีหลายหลากรูปแบบ และมีความหนาแน่นของจุลินทรีย์เป็นจำนวนมาก มีคุณสมบัติในการกักเก็บน้ำได้ดี ค่าความเป็นกรด – ด่างเป็นกลาง มีปริมาณอินทรียวัตถุที่เหมาะสม มีความพรุน ทำให้อากาศถ่ายเทได้ดี แต่มีข้อเสียคือ สามารถสลายตัวได้ตามธรรมชาติ ทำให้ต้องมีการเปลี่ยนตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารนี้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลางใหม่อยู่เสมอ ปุ๋ยหมักโดยทั่วไปมีความดันลดสูงกว่าพีท และอาจมีการบีบอัดของวัสดุตัวกลาง ดังนั้นจึงมักจะผสมกับวัสดุตัวกลางต่าง ๆ ในอัตราส่วนต่าง ๆ กับตัวกลางที่ช่วยเพิ่มความหนาแน่น เช่น เศษไม้ พีท และอื่นๆ

ข.) พีท

พีทเป็นกรดตามธรรมชาติ และไม่ชอบน้ำ เนื่องจากความไม่ชอบน้ำของพีทการควบคุมความชื้นสำหรับพีทจึงเป็นเรื่องยาก พีทไม่ได้มีเชื้อจุลินทรีย์จำนวนมากตามธรรมชาติ และจะต้องมีการเพิ่มเชื้อจุลินทรีย์ เช่น การใช้ตะกอนเร่ง พีทมีสารอาหารน้อยกว่าปุ๋ยหมักมาก และอาจต้องมีการเพิ่มสารอาหาร โดยการเติมสารอาหารเริ่มต้นอย่างช้า ๆ หรือหยดสารละลายระหว่างการดำเนินการ พีทถูกใช้เป็นตัวกลางอย่างกว้างขวางในช่วงปี 1980 เพราะมีแรงดันตกต่ำมาก พีทถูกนำมาผสมกับปุ๋ยหมักหรือตัวกลางอื่น ๆ เพื่อเพิ่มความพรุนให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นในระยะยาว และสามารถควบคุมความชื้นได้ง่ายขึ้น

ค.) ดิน

ดินถูกนำมาใช้เป็นสื่อตัวกรองทางชีวภาพเพราะมีราคาถูก อุดมสมบูรณ์ และมีประชากรจุลินทรีย์จำนวนมาก ดินโดยธรรมชาตินั้นชอบน้ำแต่เมื่อแห้งจะคืนสภาพได้ยากกว่าปุ๋ยหมัก และพีท ดินนั้นไม่ได้มีแนวโน้มว่าจะมีการไหลไปรวมตัวกันแต่การซึมผ่านนั้นก็ยังมีระดับต่ำ ดังนั้นดินจึงมีความดันลดมาก และมักมีเส้นทางการไหลของอากาศในตัวกรองมาก อย่างไรก็ตามดินนั้นเหมาะที่สุดสำหรับเครื่องกรองชีวภาพแบบเปิด เนื่องจากความสามารถในการซึมผ่านต่ำตัวกรองชีวภาพในดินมักจะทำงานโดยมีระยะเวลากักพักของก๊าซมาก และสำหรับดินบางชนิดนั้นไม่เหมาะสมสำหรับเครื่องกรองชีวภาพ เช่น ดินเหนียว

ง.) เศษไม้และเปลือกไม้

เศษไม้ และเปลือกไม้มักถูกนำมาใช้ในสัดส่วนต่าง ๆ ซึ่งเป็นตัวกลางที่มีการเพิ่มความพรุน (Porosity) โดยทั่วไปมีขนาด 1 - 5 เซนติเมตร นอกจากจะเป็นการป้องกันการบีบอัด และทำให้อากาศไหลเป็นเนื้อเดียวกัน เศษไม้ และเปลือกไม้ยังเป็นแหล่งเก็บกักน้ำซึ่งบางครั้งอาจช่วยลดความแปรผันของความชื้นในวัสดุตัวกลาง

2.6.2 ตัวกลางประเภทอนินทรีย์และตัวกลางสังเคราะห์

ตัวกลางประเภทอนินทรีย์เป็นตัวกลางที่มีการใช้ในเครื่องกรองชีวภาพ เนื่องจากตัวกลางประเภทนี้มีข้อดีคือ สามารถใช้งานในเครื่องกรองชีวภาพได้นาน และมีประสิทธิภาพในการดูดซับที่มากทำให้สามารถลดขนาดของระบบลงได้ แต่มีข้อเสียคือ ตัวกลางประเภทนี้มีค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูง ตัวอย่างของตัวกลางประเภทอนินทรีย์ และตัวกลางสังเคราะห์ ได้แก่

ก) ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์แบบเม็ดมีขนาดอนุภาคที่หลากหลายแต่ที่นิยมใช้คือถ่านกัมมันต์ที่ทำมาจากกะลามะพร้าวซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 เซนติเมตร และยาว 0.5 เซนติเมตร ถ่านกัมมันต์แบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เม็ดมีคุณสมบัติ และโครงสร้างที่ดีเนื่องจากมีขนาดอนุภาคสม่ำเสมอ ทนต่อการบีบอัดได้ดี มีความสามารถในการอุ้มน้ำได้ดี และให้พื้นที่ผิวที่เหมาะสมในการยึดเกาะของจุลินทรีย์ และมีความสามารถในการดูดซับ แต่ต้องมีการแก้ไขเรื่องธาตุอาหารที่เหมาะสมเพื่อให้จุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตได้

ข) เพอร์ไลต์

เพอร์ไลต์เป็นวัสดุที่มีรูพรุนมากมี ขนาดแตกต่างกัน (เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 - 15 มิลลิเมตร) มีราคาไม่แพง และมีพื้นที่ผิวมาก แต่ไม่มีสารอาหาร และไม่มีจุลินทรีย์ ถูกใช้เป็นวัสดุเพิ่มความพรุน

ค) ตัวกลางสังเคราะห์

ตัวกลางสังเคราะห์โดยทั่วไปเป็นวัสดุที่ทำมาจากพลาสติก โพลีโพรพีลีน เป็นต้น ข้อดีของตัวกลางประเภทนี้คือ สามารถใช้งานได้นาน โครงสร้างของตัวกลางมีความแข็งแรง แต่มีข้อเสียคือ ไม่มีคุณสมบัติในการกักเก็บน้ำ และธาตุอาหารสำหรับจุลินทรีย์ ดังนั้นตัวกลางประเภทนี้ต้องมีการเติมน้ำ และธาตุอาหาร

การเลือกใช้ตัวกลาง แสดงดังตารางที่ 2.4 เป็นการแสดงคุณสมบัติของตัวกลางที่นิยมใช้ซึ่งเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการเลือกใช้ตัวกลางที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากคุณสมบัติทางกายภาพ และประโยชน์ในการใช้งาน ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ และการเปรียบเทียบข้อแตกต่างระหว่างวัสดุที่นิยมใช้เป็นตัวกลาง

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของวัสดุที่นิยมใช้เป็นตัวกลาง

คุณสมบัติ/ตัวกลาง	**ปุ๋ยหมัก**	**พีท**	**ดิน**	**ถ่านกัมมันต์**	**วัสดุสังเคราะห์**
จำนวนจุลินทรีย์	สูง	ต่ำ-ปานกลาง	สูง	ไม่มี	ไม่มี
พื้นที่ผิวสัมผัส	ปานกลาง	สูง	ต่ำ-ปานกลาง	สูง	สูง
การซึมผ่านอากาศ	ปานกลาง	สูง	ต่ำ	ปานกลาง-สูง	สูงมาก
ปริมาณธาตุอาหาร	สูง	ปานกลาง-สูง	สูง	ไม่มี	ไม่มี
สามารถในการดูดซับ	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง	ต่ำ-สูง	ไม่มี
อายุการใช้งาน	2-4 ปี	2-4 ปี	>30 ปี	>5 ปี	>15 ปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 (ต่อ) คุณสมบัติของวัสดุที่นิยมใช้เป็นตัวกลาง

คุณสมบัติ/ตัวกลาง	ปุ๋ยหมัก	พีท	ดิน	ถ่านกัมมันต์	วัสดุสังเคราะห์
สามารถในการดูดซับ	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง	ต่ำ-สูง	ไม่มี
อายุการใช้งาน	2-4 ปี	2-4 ปี	>30 ปี	>5 ปี	>15 ปี
ราคา	ต่ำ	ต่ำ	ต่ำมาก	ปานกลาง-สูง	สูงมาก
การใช้งานทั่วไป	ง่ายและคุ้มค่าต่อลงทุน	มีปัญหาเรื่องการควบคุมความชื้น	ใช้กับระบบที่มีภาระบรรทุกต่ำ	ต้องเติมธาตุอาหารอาจทำให้ราคาสูง	เหมาะสำหรับ biotrickling filters

ที่มา: Devinny et al.,1999

2.7 พารามิเตอร์ในการควบคุมและการออกแบบระบบ

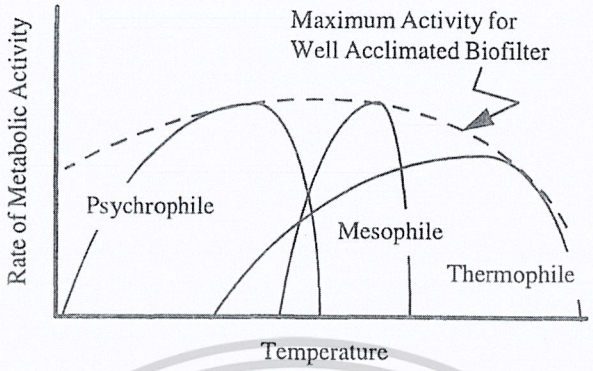
การออกแบบเครื่องกรองชีวภาพสามารถออกแบบได้หลายรูปแบบ แต่หน้าที่การทำงานจะเหมือนกัน เครื่องกรองชีวภาพสามารถออกแบบได้ทั้งแบบปิด และเปิด หรือเป็นแบบติดตั้งด้วยการขุดเปิดหน้าดิน หรือเป็นแบบถังปฏิกิริยา โดยทั่วไปส่วนประกอบหลักของเครื่องกรองชีวภาพจะประกอบด้วย ชั้นตัวกลาง (Media Packed Bed) ระบบกระจายอากาศ (Air Distribution System) เครื่องทำความชื้น (Humidifier) และเครื่องจ่ายอากาศ (Blower) ส่วนอุปกรณ์ทางเลือกเสริมของเครื่องกรองชีวภาพนั้นประกอบด้วย อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchange Chamber) เพื่อปรับอุณหภูมิให้เหมาะสมกับระบบ และระบบกระจายน้ำ (Water Sprinkler System) ซึ่งใช้ในการควบคุมความชื้นของพื้นผิวชั้นตัวกลาง

2.7.1 อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิมีผลอย่างมากกับกิจกรรมของจุลินทรีย์ จุลินทรีย์นั้นจะทำงานได้ดีเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จุลินทรีย์เหล่านี้จะต้องมีการทำงานที่ประสานกัน หากจุลินทรีย์ตัวใดเกิดการเจริญเติบโตมากเกินไปจะส่งผลให้ขาดแคลนสารประกอบบางอย่างซึ่งจะส่งผลเสียต่อจุลินทรีย์ชนิดอื่น จุลินทรีย์แต่ละชนิดจะทำงานได้ดีที่อุณหภูมิช่วงหนึ่ง อัตราการเกิดปฏิกิริยาส่วนใหญ่จะเพิ่มขึ้นสองเท่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 10 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามการที่อุณหภูมิสูงอาจทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว แต่หากถ้าอุณหภูมิเพิ่มมากเกินไปจะเป็นทำลายเอนไซม์ซึ่งเป็นโปรตีน ทำให้เอนไซม์ไม่มีประสิทธิภาพอีกต่อไป ส่วนประกอบของเซลล์อื่น ๆ ก็อาจได้รับความเสียหาย เช่น ไขมันเป็นโครงสร้างของเยื่อหุ้มเซลล์สามารถย่อยสลายได้ที่อุณหภูมิสูง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงจุดที่จุลินทรีย์แต่ละสายพันธุ์ไม่สามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ อัตราของกระบวนการเมตาบอลิซึมก็จะลดลงอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งเซลล์ตายจากความร้อน



รูปที่ 2.7 ผลของอุณหภูมิต่อชนิดของจุลินทรีย์และกิจกรรมในเครื่องกรองชีวภาพ
ที่มา: Devniny et al., 1999

จากรูปที่ 2.7 เซลล์ของจุลินทรีย์จะทำงานได้ดีที่อุณหภูมิหนึ่งจากนั้นประสิทธิภาพการทำงานจะลดลงอย่างรวดเร็ว หากเครื่องกรองชีวภาพมีจุลินทรีย์เพียงชนิดเดียวซึ่งสามารถบอกได้ว่าประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีสุดของเครื่องกรองชีวภาพคืออุณหภูมิสูงสุดของเส้นโค้ง อย่างไรก็ตามเครื่องกรองชีวภาพมีจุลินทรีย์หลายชนิด และผลในระยะยาวของระบบนิเวศของจุลินทรีย์อาจแตกต่างจากผลระยะสั้นของจุลินทรีย์ชนิดเดียว เมื่อระบบมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอาจทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถทำกิจกรรมต่าง ๆ ได้ และทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดโดยรวมลดลงอย่างรวดเร็ว แต่ถ้าหากอุณหภูมินั้นมีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ ประสิทธิภาพการบำบัดจะค่อย ๆ กลับมาดีขึ้นอีกครั้ง

2.7.2 ปริมาณน้ำ (Water Content)

ปริมาณน้ำในเครื่องกรองชีวภาพเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมากในการดำเนินระบบ หากไม่มีการควบคุมปริมาณน้ำในเครื่องกรองชีวภาพหรือหากมีความยากลำบากในการควบคุมปริมาณน้ำจะทำให้เครื่องกรองชีวภาพมีประสิทธิภาพการบำบัดที่ไม่ดี เครื่องกรองชีวภาพในการควบคุมมลพิษทางอากาศแตกต่างจากที่ใช้ในการบำบัดน้ำเพราะพื้นที่ผิวส่วนใหญ่จะเต็มไปด้วยอากาศ แต่น้ำก็ยังคงมีความจำเป็น จุลินทรีย์นั้นจะไม่สามารถทำกิจกรรมต่าง ๆ ได้หากปราศจากน้ำ นอกจากนี้น้ำยังมีผลต่อการถ่ายโอนสารปนเปื้อนจากอากาศ และเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของตัวกลางอีกด้วย โดยมีผลกระทบดังนี้

ก) ผลกระทบทางชีวภาพ (Biological Effects)

น้ำมีความสำคัญต่อจุลินทรีย์ แต่จุลินทรีย์นั้นจะได้รับแรงดันออสโมติกจากน้ำ น้ำมีแนวโน้มที่จะไหลเข้าสู่เซลล์ของจุลินทรีย์เพราะน้ำมีความเข้มข้นของสารมลพิษที่สูง เซลล์จุลินทรีย์นั้นจะมีกิจกรรมของเซลล์ที่ลดต่ำลง และจะมีความเข้มข้นของสารมลพิษเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการแพร่กระจายของน้ำนั้นช้ากว่าอากาศ ดังนั้นวัสดุตัวกลางที่อยู่ด้านล่างจะเต็มไปด้วยน้ำทำให้เซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

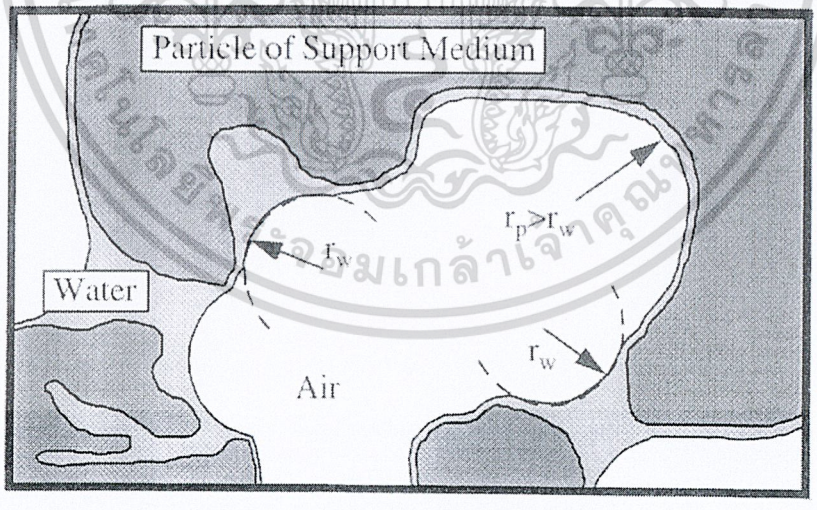
จุลินทรีย์ที่อยู่ด้านล่างมีปัญหาเรื่องการรับสารตั้งต้น และออกซิเจนจากอากาศ และต้องเผชิญกับมลพิษที่มีความเข้มข้นสูง

ข) ผลกระทบต่อการแยกตัว (Partition Effects)

ปริมาณน้ำนั้นมีผลต่อการถ่ายเทมวล เนื่องการขั้นตอนการกรองทางชีวภาพเป็นการถ่ายเทมวลของสารมลพิษจากอากาศไปสู่น้ำ ก่อนที่จะเข้าสู่กลไกต่าง ๆ เช่น การดูดซับ การดูดซึม การย่อยสลายทางชีวภาพ โดยที่ถ้ามีปริมาณน้ำมากหมายความว่า สารมลพิษละลายน้ำได้มากขึ้น โอกาสในการย่อยสลายก็จะมากขึ้นด้วย

ค) การขัดขวางการไหลของอากาศ (Interference with Air Flow)

ปริมาณน้ำที่มากเกินไปส่งผลให้อากาศไม่สามารถไหลผ่านรูพรุนที่เต็มไปด้วยน้ำได้ นอกจากนี้น้ำยังทำให้อากาศไม่สามารถไหลผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาคได้ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ด้วยเหตุนี้น้ำส่วนเกินในเครื่องกรองชีวภาพจะมีแนวโน้มที่จะรบกวนการไหลของอากาศ สำหรับตัวกลางที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ และมีความเสถียร เช่น ถ่านกัมมันต์ ผลกระทบนี้จะเกิดขึ้นน้อย อย่างไรก็ตามหากวัสดุตัวกลางมีขนาดอนุภาคเล็ก เช่น ดิน และปุ๋ยหมักหากมีน้ำมากเกินไปจะทำให้อากาศไม่สามารถไหลผ่านเครื่องกรองชีวภาพได้ ซึ่งอาจทำให้เกิดสภาวะไร้อากาศในบางส่วนของเครื่องกรองชีวภาพซึ่งไม่เหมาะสมในการบำบัดสารปนเปื้อน และอาจสร้างสารที่มีกลิ่น เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และเมอร์แคปแทน เมื่อน้ำในเครื่องกรองชีวภาพเพิ่มขึ้น น้ำจะเต็มรูพรุนขนาดเล็กทำให้ปริมาณที่พื้นที่ผิวที่สัมผัสกับอากาศได้น้อยลง สิ่งเหล่านี้อาจลดอัตราการถ่ายโอนของสารปนเปื้อน และออกซิเจน



รูปที่ 2.8 การกระจายของน้ำในตัวกลางที่มีรูพรุน
ที่มา: Devniny et al., 1999

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.3 จุลินทรีย์

ในเครื่องกรองชีวภาพจุลินทรีย์จะทำหน้าที่ย่อยสลายสารมลพิษให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่เป็นอันตราย เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ พลังงาน และชีวมวล นอกจากจุลินทรีย์แล้วในฟิล์มชีวภาพยังประกอบไปด้วยแบคทีเรีย และรา ข้อดีของแบคทีเรียคือ สามารถใช้สารอาหารในการเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็วในสภาวะที่เหมาะสม ส่วนราจะมีการเจริญเติบโตที่ช้า และมีขนาดใหญ่กว่าแบคทีเรีย ทำให้รามีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรน้อยกว่าแบคทีเรีย และราทนต่อสภาวะต่าง ๆ ได้ดี แต่ที่สำคัญราจะสร้างเส้นใยที่ซับซ้อนซึ่งขัดขวางการไหลของอากาศ และยังเป็นตัวประสานระหว่างตัวกลาง หากราเติบโตมากขึ้นจะทำให้ค่าความดันลดสูงขึ้น

2.7.4 ปัจจัยจำกัดด้านออกซิเจน (Oxygen Limitation)

ปัจจัยจำกัดด้านออกซิเจนอาจเกิดขึ้นภายในฟิล์มชีวภาพ การที่ออกซิเจนเป็นปัจจัยจำกัดจะส่งผลต่ออัตราการย่อยสลายทางชีวภาพ ถ้าใช้ออกซิเจนหมดอย่างสมบูรณ์ในฟิล์มชีวภาพ ในกรณีนี้เป็นปัจจัยจำกัด (Double Limitation) และอัตราการย่อยสลายมลพิษอธิบายโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Michaelis-Menten ดังแสดงในสมการที่ 2.8

$$k = k_{max} \frac{C_{L,j}}{K_{M,j} + C_{L,j}} \cdot \frac{C_{L,O}}{K_{M,O} + C_{L,O}} \qquad 2.8$$

โดยที่ k = อัตราการย่อยสลายทางชีวภาพ

k_{max} = อัตราการย่อยสลายทางชีวภาพสูงสุด

$K_{M,j}$ = ค่าคงที่การอิ่มตัวของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย

$K_{M,O}$ = ค่าคงที่การอิ่มตัวของออกซิเจน

$C_{L,j}$ = ความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย

$C_{L,O}$ = ความเข้มข้นของออกซิเจน

การที่ออกซิเจนเป็นปัจจัยจำกัดอาจดูขัดแย้ง แต่เนื่องจากในอากาศมีปริมาณออกซิเจน 21 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามเหตุผลที่ออกซิเจนเป็นปัจจัยจำกัดนั้น เนื่องจากสัมประสิทธิ์การแยกตัวของก๊าซออกซิเจนจากน้ำเท่ากับ 33.5 หมายความว่า ปริมาณออกซิเจนที่อยู่ในอากาศจะมากกว่าปริมาณออกซิเจนในน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ก๊าซออกซิเจนมีความสามารถในการละลายน้ำ 8.1 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ 0.253 มิลลิโมลต่อลิตร เพราะฉะนั้นหากพิจารณาจากปริมาณสมมูลปริมาณออกซิเจนที่จำเป็นต้องใช้ในการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (เป็นความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่รอยต่อระหว่างอากาศกับน้ำ) มากกว่า 0.25 มิลลิโมลต่อลิตร (เป็นความเข้มข้นของออกซิเจนที่รอยต่อระหว่างน้ำกับอากาศ) มีโอกาสที่ออกซิเจนในฟิล์มชีวภาพหมดก่อนที่จะนำไปใช้บำบัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย เป็นสิ่งที่ควรพิจารณาควบคู่ไปกับคุณสมบัติของสารมลพิษ และอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.5 ความเป็นกรด – ด่างของตัวกลาง (Medium pH and Alkalinity)

ความเป็นกรด – ด่าง มีผลกระทบต่อจุลินทรีย์ ซึ่งอาจยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์หรืออาจส่งผลให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตได้ดี ช่วงความเป็นกรด - ด่างของแต่ละสปีชีส์จะมีความแตกต่างกัน จุลินทรีย์ส่วนใหญ่ทำงานได้ดีในสภาวะกรด – ด่างเป็นกลาง การเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของค่าความเป็นกรด – ด่างจะสร้างความเสียหายให้แก่จุลินทรีย์ อย่างไรก็ตามระบบนิเวศของจุลินทรีย์จะมีการปรับตัวให้เข้ากับการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด – ด่างอย่างช้า ๆ โดยทั่วไปเครื่องกรองชีวภาพมักมีการออกแบบให้ทำงานที่ค่าความเป็นกรด – ด่างประมาณ 7 ซึ่งเป็นที่ยอมรับ การควบคุมความเป็นกรด – ด่างในเครื่องกรองชีวภาพอาจทำได้โดยการเติมบัฟเฟอร์ เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น

สำหรับกิจกรรมของจุลินทรีย์ส่วนใหญ่ต้องมีค่าความเป็นกรด – ด่างของวัสดุตัวกลางเท่ากับ 6 - 8 (Devinny et al.,1999) แม้ว่าในบางกรณีเมื่อทำการบำบัดอาจเกิดสารประกอบกำมะถันส่งผลให้ค่าความเป็นกรด – ด่างต่ำที่สุด 2 - 4 โดยไม่มีการสูญเสียประสิทธิภาพการบำบัดสารมลพิษที่เป็นนัยสำคัญ

2.7.6 ภาระบรรทุกสารมลพิษ (Contaminant Load and Surface Load)

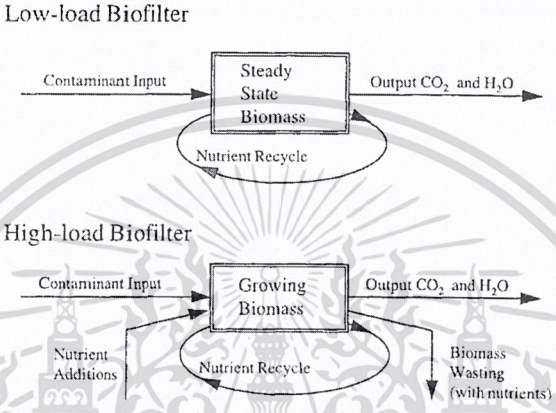
ภาระบรรทุก คือ มวลของสารปนเปื้อนที่เข้าสู่เครื่องกรองชีวภาพต่อหน่วยเวลา และปริมาตร ภาระบรรทุกเป็นสิ่งสำคัญต่อเครื่องกรองชีวภาพซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยที่ประสิทธิภาพการบำบัดจะดีเมื่อภาระบรรทุกต่ำ แต่ไม่ดีเมื่อภาระบรรทุกสูง การที่ตัวกลางเป็นกรดและมีภาระบรรทุกสูงอาจเกิดการล้มเหลวของระบบได้หากมี และการย่อยสลายสารต่าง ๆ อาจทำให้เกิดกรดขึ้นมาก เครื่องกรองชีวภาพที่มีภาระบรรทุกต่ำจะมีสภาวะที่คงตัวโดยเกี่ยวข้องกับมวล และสารอาหาร ภาระบรรทุกสารปนเปื้อนอาจแบ่งได้ดังนี้ ภาระบรรทุกสูง อัตราการไหลสูง และภาระบรรทุกต่ำ อัตราการไหลต่ำ ภายใต้สภาวะต่างๆที่มีความเข้มข้นสูงจะมีประสิทธิภาพการบำบัดสูงขึ้น เนื่องจากความเข้มข้นของสารมลพิษในฟิล์มชีวภาพสูงขึ้นจะทำให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพสูงขึ้น เมื่อค่าจลนศาสตร์ทางชีวภาพสูงกว่าปฏิกิริยาอันดับศูนย์ ในกรณีที่การแพร่เป็นปัจจัยจำกัดสารมลพิษในอากาศที่ความเข้มข้นมากกว่าจะเป็นตัวผลักดันให้มลพิษแพร่เข้าสู่ฟิล์มชีวภาพได้เร็วมากยิ่งขึ้น

2.7.7 ธาตุอาหาร (Nutrients)

จุลินทรีย์ในเครื่องกรองชีวภาพใช้สารปนเปื้อนเป็นพลังงาน และแหล่งคาร์บอน อย่างไรก็ตามจุลินทรีย์ในเครื่องกรองชีวภาพต้องการสารอาหารไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม ซึ่งจุลินทรีย์ไม่สามารถสังเคราะห์ด้วยตัวเองได้ วัสดุตัวกลางอินทรีย์อย่างปุ๋ยหมักมีข้อได้เปรียบคือ มีสารอาหาร ซึ่งจำเป็นต่อการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ ความต้องการอาหารของจุลินทรีย์นั้นเหมือนกันกับพืชดังนั้นแร่ธาตุ และองค์ประกอบที่ถูกปล่อยออกมาควรอยู่ในสัดส่วนที่เหมาะสมจะทำให้เซลล์เจริญเติบโตได้อย่างดี วัสดุตัวกลางอนินทรีย์ เช่น หิน ถ่านกัมมันต์ พลาสติก หรือ โพลียูรีเทน โฟม ไม่มีสารอาหารที่เหมาะสม สิ่งเหล่านี้ต้องมีการเพิ่มสารอาหารเมื่อถูกใช้ในเครื่องกรองชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายในเครื่องกรองชีวภาพโดยปกติแล้วมีเฟสของเหลวที่คงที่ (Stationary Water Phase) และมีระบบนิเวศของจุลินทรีย์คงที่ ดังนั้นจึงสามารถคาดการปริมาณธาตุอาหาร และนำกลับมาใช้ใหม่ได้อย่างต่อเนื่อง การย่อยสลายของมวลชีวภาพจะปล่อยสารอาหารออกมาในรูปแบบที่สามารถละลายน้ำได้ ซึ่งจุลินทรีย์สามารถนำกลับมาใช้ได้อีกครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 2.9 อย่างไรก็ตามเครื่องกรองชีวภาพบางครั้งอาจมีน้ำชะ ไม่ว่าจะโดยเจตนาหรือไม่เจตนาก็ตาม และการที่เกิดน้ำชะน้ำเป็นการนำสารอาหารออกจากเครื่องกรองชีวภาพ นอกจากนี้หากจุลินทรีย์มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วจะทำให้สารอาหารลดลงอย่างรวดเร็ว และขัดขวางการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์



รูปที่ 2.9 การเปรียบเทียบระบบการทำงานของเครื่องกรองชีวภาพ
ที่มา: Devniny et al., 1999

2.8 ตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพของระบบ

2.8.1 เวลากักพัก (Empty Bed Residence Time, EBRT) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลอากาศ และปริมาตรของตัวกลางภายในเครื่องกรองชีวภาพ ดังแสดงในสมการที่ 2.9

$$EBRT = \frac{V_f}{Q_{air}} \qquad 2.9$$

โดยที่ V_f = ปริมาตรทั้งหมดของตัวกลาง

Q_{air} = อัตราไหลของอากาศ

2.8.2 ภาระบรรทุก (Mass Loading) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลของสารมลพิษต่อหน่วยปริมาตรของตัวกลางในเครื่องกรองชีวภาพ ดังแสดงในสมการที่ 2.10

$$\text{Mass Loading rate} = \frac{Q_{Air} \times C_{in}}{V_f} \qquad 2.10$$

โดยที่ C_{in} = ความเข้มข้นของมลพิษที่เข้าระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.3 ประสิทธิภาพการบำบัด (Removal Effciency) แสดงประสิทธิภาพการกำจัดสารมลพิษที่เข้าระบบ ดังแสดงในสมการที่ 2.11

$$\text{Removal Effciency} = \frac{C_{in} \times C_{out}}{C_{in}} \times 100 \qquad 2.11$$

โดยที่ C_{in} = ความเข้มข้นของสารมลพิษเข้าสู่ระบบ

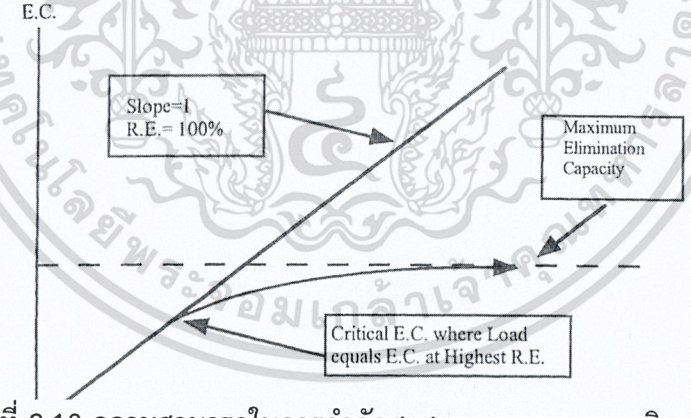
C_{out} = ความเข้นข้นของสารมลพิษออกจากระบบ

2.8.4 ความสามารถในการกำจัดสารมลพิษ (Elimination Capacity) คือ มวลของสารมลพิษที่ถูกกำจัดไปต่อหน่วยปริมาตรของตัวกลางต่อหน่วยเวลา ดังแสดงในสมการที่ 2.12

$$\text{Elimination Capacity (EC)} = \frac{Q_{Air} * (C_{in} - C_{out})}{V_f} \qquad 2.12$$

2.8.5 ความสามารถในการกำจัดสูงสุด (Maximum Elimination Capacity, ECmax)

ความสามารถในการกำจัดสูงสุด (Maximum Elimination Capacity, ECmax) คือค่าความสามารถในการกำจัดสูงสุดที่เครื่องกรองชีวภาพสามารถกำจัดได้ โดยที่ไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารมลพิษ และระยะเวลากักพัก วิธีการวิเคราะห์ค่าความสามารถในการกำจัดสูงสุดสามารถทำได้โดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการกำจัด และค่าภาระบรรทุกของสารมลพิษ ตามรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ความสามารถในการกำจัดสูงสุดและภาระบรรทุกวิกฤติ

ที่มา: Devinny et. al (1999)

2.8.6 ภาระบรรทุกวิกฤติ (Critical Loading) คือ ค่าภาระบรรทุกสารมลพิษที่เข้าระบบเครื่องกรองชีวภาพที่ส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพการบำบัดต่ำกว่า 100 เปอร์เซ็นต์ วิธีการวิเคราะห์ค่าภาระบรรทุกวิกฤติสามารถทำได้โดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการกำจัดและค่าภาระบรรทุกของสารมลพิษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 Eakchai Lertphadungwit (2004)

รายงานการวิจัยเรื่องการบำบัดไซลีนด้วยเครื่องกรองชีวภาพที่ใช้ตัวกลางผสม โดยงานวิจัยนี้มีความเข้มข้นของก๊าซไซลีนที่เข้าระบบอยู่ในช่วงตั้งแต่ 20 ถึง 2000 ส่วนในล้านส่วน แปรผันเวลากักพักที่ 36, 60 และ 90 วินาที โดยมีระยะเวลาในการเดินระบบ 60 วัน และมีการแปรผันอัตราส่วนของตัวกลางผสมซึ่งเป็นตัวกลางผสมระหว่าง ดินใบก้ามปู และปุ๋ยหมักต่อขยะพลาสติกดังนี้ 80 : 20, 60 : 40, 40 : 60 และ 20 : 80 โดยปริมาตร พบว่าตัวกลางที่มีอัตราส่วนผสมระหว่าง 60 : 40 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซไซลีน โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดไซลีนสูงสุดเท่ากับ 96 % ส่วนความสามารถในการกำจัดไซลีนสูงสุดมีค่าเท่ากับ 70, 142 และ 194 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงที่เวลากักพัก 36, 60 และ 90 วินาที ตามลำดับ

2.9.2 Jirawat Kanpayan (2005)

รายงานการวิจัยเรื่องการกำจัดไอออะซิโตนโดยเครื่องกรองชีวภาพ โดยงานวิจัยนี้มีความเข้มข้นของไอออะซิโตนที่ใช้อยู่ในช่วง 200 ถึง 1000 ส่วนในล้านส่วน มีการแปรผันเวลากักพักระหว่าง 51 ถึง 102 วินาที ระยะเวลาในการเดินระบบ 95 วัน ใช้ตัวกลาง 4 ชนิด ได้แก่ ดินใบก้ามปู ดินสีดา ปุ๋ยหมัก และขี้กบ อัตราตัวกลางผสมประกอบด้วย ตัวกลางหลัก : เศษไม้ : ตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชน : ปุ๋ยคอก 60 : 20 : 10 : 10 โดยปริมาตร พบว่าปุ๋ยหมักเป็นวัสดุที่มีความเหมาะสมในการกำจัดอะซิโตน โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดเท่ากับ 92 % ที่เวลากักพักเท่ากับ 68 วินาที จากงานวิจัยนี้ได้ให้ข้อเสนอแนะว่า ให้ทำการศึกษาการเปลี่ยนทิศทางการไหลเข้าของอากาศ ทำการสลับการไหลขึ้น และไหลลง ซึ่งคาดว่าจะช่วยแก้ไขเรื่องกรองอุดตันของจุลินทรีย์ในส่วนล่างของเครื่องกรองชีวภาพได้

2.9.3 Nttapol Rattanamuk (2006)

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการบำบัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยเครื่องกรองชีวภาพที่ใช้ตัวกลางผสม ซึ่งมีการศึกษาตัวกลางที่เหมาะสมในการบำบัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวกลางหลัก 4 ประเภท ได้แก่ ปุ๋ยหมัก ดินขุยไผ่ หินภูเขาไฟ และถ่านกัมมันต์ โดยใช้ตะกอนจากโรงงานบำบัดน้ำเสียเป็นแหล่งจุลินทรีย์ ในการทดลองมีการใช้กาบมะพร้าวเป็นตัวกลางเสริมเพื่อป้องกันการอัดตัวของชั้นตัวกลาง อัตราส่วนตัวกลางผสมประกอบด้วย ตัวกลางหลัก : กาบมะพร้าว : ตะกอนจากโรงงานน้ำเสีย : ปุ๋ยคอกเท่ากับ 60 : 20 : 10 : 10 โดยปริมาตร มีการแปรผันเวลากักพักเท่ากับ 45, 60 และ 75 วินาที มีความเข้มข้นก๊าซไอโดรเจนซัลไฟด์อยู่ในช่วง 50 ถึง 300 ส่วนในล้านส่วน ผลการทดลองพบว่าความสามารถในการกำจัดสูงสุดของตัวกลางประเภทปุ๋ยหมัก ดินขุยไผ่ หินภูเขาไฟ และถ่านกัมมันต์ มีค่าเท่ากับ 122, 111, 72 และ 108 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ต่อชั่วโมง ตามลำดับ และการทดสอบทิศทางการไหลของกระแสก๊าซในเครื่องกรองชีวภาพพบว่ามีประสิทธิภาพการบำบัดใกล้เคียงกับเครื่องกรองชีวภาพที่มีทิศทางการไหลขึ้นที่เวลากักพัก 50 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นไป ในขณะที่เวลากักพักมีค่าน้อยกว่า 25 วินาที พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดเครื่องกรองชีวภาพที่มีทิศทางการไหลลงมีค่าน้อยกว่าเครื่องกรองชีวภาพที่มีทิศทางการไหลขึ้น

2.9.4 Wongpun Limpaseni (2018)

วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์เรื่องการบำบัดไอระเหยตัวทำละลายอินทรีย์ด้วยเครื่องกรองชีวภาพงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องกรองชีวภาพในการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่ใช้เป็นตัวทำละลายในอุตสาหกรรม ได้แก่ ไอระเหยของโทลูอีน ไซลีน และทินเนอร์ ซึ่งประกอบด้วยโทลูอีนประมาณ 64% แบ่งการทดลองออกเป็น 3 การทดลองคือ การบำบัดไอระเหยของโทลูอีน ไอระเหยไซลีน และไอระเหยทินเนอร์ที่ความเข้มข้นของไอระเหย 50, 100, 200, 300 และ 400 ส่วนในล้านส่วน (ppm) เวลากักพัก (Empty Bed Retention Time, EBRT) 30, 60 และ 90 วินาที เครื่องกรองชีวภาพประกอบด้วยตัวกลางผสมของปุ๋ยหมัก ปุ๋ยคอก เศษไม้ และตะกอนจุลินทรีย์อัตราส่วน 60 : 10 : 20 : 10 โดยปริมาตรอัตราการไหลเท่ากับ 6.28 ลิตรต่อนาที ผลการศึกษาพบว่าที่ความเข้มข้นโทลูอีน 50 ppm เวลากักพัก 90 วินาที สามารถบำบัดไอระเหยของโทลูอีนได้ 99.9±0.1% เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 100, 200, 300 และ 400 ppm เวลากักพัก 90 วินาที สามารถบำบัดไอระเหยของโทลูอีนได้ 97.8±1.7% 91.5±1.0% 86.4±2.0% และ 78.5±3.0% ตามลำดับ การบำบัดไอระเหยไซลีนพบว่าที่ความเข้มข้น 50 ppm เวลากักพัก 90 วินาที สามารถบำบัดไอระเหยของไซลีนได้ 97.5±1.9% เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 100, 200, 300 และ 400 ppm เวลากักพัก 90 วินาทีสามารถบำบัดไอระเหยของไซลีนได้ 99.5±0.5%, 96.6±1.1%, 93.4±1.1% และ 85.9+1.6% ตามลำดับการบำบัดไอระเหยทินเนอร์พบว่าที่ความเข้มข้น 50 ppm เวลากักพัก 90 วินาทีสามารถบำบัดไอระเหยของทินเนอร์ได้ 99.30±3 % เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 100, 200, 300 และ 400 ppm เวลากักพัก 90 วินาที สามารถบำบัดไอระเหยของทินเนอร์ได้ 99.1±0.4%, 95.6±0.4%, 87.0±4.1% และ 70.5±5.8% ตามลำดับ

2.9.5 Munna Kumar (2019)

จุดประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องกรองชีวภาพที่มีส่วนผสมของปุ๋ยหมัก และถ่านกัมมันต์สำหรับการกำจัดโทลูอีนในเฟสแก๊สภายใต้อัตราไหลป้อนเข้าของสารมลพิษที่สูง โดยใช้ปูนปลาสเตอร์เป็นสารยึดเกาะเพื่อปรับปรุงความแข็งแรง และความทนทานของวัสดุตัวกลาง เครื่องกรองชีวภาพเป็นระบบแบบต่อเนื่องถูกใช้งานเป็นระยะเวลาประมาณ 110 วัน และที่อัตราการไหลที่แตกต่างกัน 4 แบบ(0.069, 0.084, 0.126 และ 0.186 ลบ.ม./ชม.)และอัตราการป้อนเข้าของโทลูอีน 160 ถึง 8,759 ก./ลบ.ม. ชม. ความสามารถในการกำจัดสูงสุด (EC) ที่ทำได้ในการศึกษานี้คือ 6,665 ก./ลบ.ม. ชม. ในขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัด (RE) อยู่ที่ประมาณ 70 ถึงมากกว่า 95% ขึ้นอยู่กับอัตราไหลป้อนเข้าของสารมลพิษที่ทดสอบ เครื่องกรองชีวภาพสามารถกำจัดโทลูอีนมากกว่า 99% โดยใช้ Pseudomonas sp. RSST (MG 279053) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชีวภาพที่ย่อยสลายโทลูอีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ รวมทั้งการประกอบเป็นชุดเครื่องกรองชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการในการวิจัยครั้งนี้ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 โดยการวิเคราะห์พารามิเตอร์ในเครื่องกรองชีวภาพทุกวัน พารามิเตอร์ที่มีการตรวจวัด เช่น ความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ระเหย อุณหภูมิ ความชื้นตัวกลาง ความเป็นกรด - ด่างของตัวกลาง ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น

ตารางที่ 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

พารามิเตอร์	**เครื่องมือ อุปกรณ์ รุ่นและขนาด**
ความเข้มข้นสารประกอบอินทรีย์ระเหย	เครื่องวัดความเข้มข้นสารประกอบอินทรีย์ระเหยเครื่อง Multi-Gas Monitors USA. ยี่ห้อ mPower (Model : POLI MP400P และเครื่อง Xiaomi Mijia Air Detector
การป้อนไอระเหย	ปั๊มอากาศ N 86 LABOPORT Model : N86KN.18 - IP20
อุณหภูมิ	เทอร์โมมิเตอร์
ความชื้นของตัวกลาง	ตู้อบ Hot Air Oven Models - 30 - 1060
ความเป็นกรด - ด่างของตัวกลาง	pH - indicator strips pH 0 - 14 universal indicator : 100 test
ความชื้นในกระแสอากาศ	เครื่อง Xiaomi Mijia Air Detector
ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์	เครื่อง Xiaomi Mijia Air Detector
ความเข้มข้นของฝุ่น PM 2.5 ในกระแสอากาศ	เครื่อง Xiaomi Mijia Air Detector
อุณหภูมิของกระแสอากาศ	เครื่อง Xiaomi Mijia Air Detector
อัตราการไหลของกระแสอากาศ	กระบอกตวงขนาด 1 ลิตร วัดโดยการแทนที่น้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 แผนการทดลอง

การวิจัยครั้งนี้เป็นออกแบบชุดการทดลองเบื้องต้นเพื่อศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายโดยเครื่องกรองชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการ จำนวน 9 ชุดการทดลอง (ดังแสดงในตาราง 3.3) ใช้วัสดุตัวกลางหลัก 3 ประเภทคือ 1) ปุ๋ยหมัก และถ่านกัมมันต์ 2) ปุ๋ยมูลไก่ และถ่านกัมมันต์ 3) ปุ๋ยหมักผสมปุ๋ยมูลไก่อัตราส่วน 20 : 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และถ่านกัมมันต์ โดยทำการศึกษาถึงความเหมาะสมของวัสดุตัวกลางที่เลือกใช้ ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย ศึกษาเปรียบเทียบวัสดุตัวกลางที่เหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย และศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องกรองชีวภาพ

3.2.1 วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุตัวกลาง

การวิจัยครั้งนี้มีการเลือกใช้วัสดุตัวกลางชนิดต่าง ๆ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องกรองชีวภาพ ได้แก่ กาบมะพร้าวเพื่อป้องกันการอัดตัว ถ่านกัมมันต์เพื่อดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่าย ไบโอมีเดียเพื่อเป็นที่ยึดเกาะของจุลินทรีย์ และเติมปุ๋ยคอก, ปุ๋ยมูลไก่เป็นแหล่งธาตุอาหารให้จุลินทรีย์ คุณสมบัติของวัสดุตัวกลางเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับเครื่องกรองชีวภาพ โดยการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุตัวกลางเป็นไปดังแสดงในตารางที่ 3.2

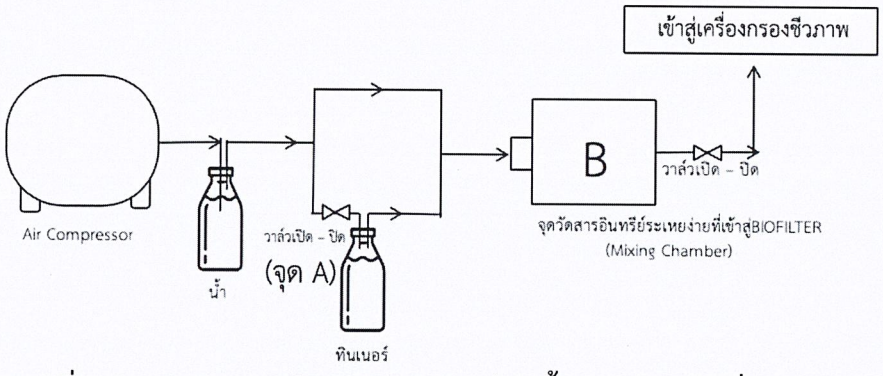
ตารางที่ 3.2 วิธีทดสอบลักษณะคุณสมบัติของวัสดุตัวกลางที่เลือกใช้

พารามิเตอร์	มาตรฐาน / เครื่องมือทดสอบ	ตัวอย่างที่ทดสอบ
ความเป็นกรด - ด่าง	pH Meter	ปุ๋ยคอก, ปุ๋ยมูลไก่
ความพรุน	Core Method	
ความหนาแน่น	JS 1474 - 1976	
ปริมาณ TKN	Kjeldahl Method	
ปริมาณอินทรียวัตถุ	Walkley Black Method	
ปริมาณฟอสฟอรัส	Bray II Method	
ปริมาณโพแทสเซียม	Flame Spectrophotometer	

3.2.2 การจำลองสถานการณ์ปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยง่าย

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่ายก่อนเข้าสู่เครื่องกรองชีวภาพค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่พิจารณาในการทดลองมีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แผนภาพการจำลองสถานการณ์ปนเปื้อนสารอินทรีย์ที่ระเหยง่าย

จากรูปที่ 3.1 ตัวแปรคงที่ มีการพ่นอากาศลงในภาชนะบรรจุทินเนอร์ซึ่งใช้วาล์วส่วนจุด A เป็นตัวควบคุม ให้ปั๊มใช้อัตราการไหลของอากาศ 5.742 ลิตรต่อนาที จากนั้นให้ปั๊มดันอากาศที่ปนเปื้อนไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่ายไหลเข้าสู่ภาชนะผสมกับอากาศในบรรยากาศ ณ จุด B ปิดวาล์วส่วนจุด A เมื่อได้ความเข้มข้นที่ต้องการ โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของสารอินทรีย์ระเหยง่ายภายในภาชนะวัดโดย Xiaomi Mijia Air Detector : 1.000 – 1.200 ppm เมื่ออากาศผสมผสานได้ความเข้มข้นที่ต้องการจึงทำการตรวจวัดค่า ตรวจวัดค่าทุก ๆ 1 นาที นาน 10 นาที ตัวแปรอิสระเนื่องจากทำในสภาวะบรรยากาศจริง จึงมีตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้คืออุณหภูมิของกระแสอากาศช่วง 25 - 31 องศาเซลเซียส และความชื้นภายในกระแสอากาศ 70 – 100 (การทดลองสร้างสถานการณ์ปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยง่าย ดังแสดงในภาคผนวก ง.)

3.2.3 การเทียบเครื่องมือวัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย

ในการเปรียบเทียบเครื่องมือวัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย ระหว่างเครื่อง Multi - Gas Monitors USA. ยี่ห้อ mPower (Model : POLI MP400P) ที่ผ่านการปรับเทียบสำหรับการตรวจวัด VOCs แล้ว (Calibration) ดังใบรับรองจากบริษัท (เอกสารในภาคผนวก ข.) และเครื่อง Xiaomi Mijia Air Detector ที่มีขนาดเล็กสำหรับการพกพา หรือตรวจวัด ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ได้ง่าย ดังแสดงในรูปที่ 3.2 การทดลองเครื่องมือวัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย ดำเนินการเหมือนการจำลองสถานการณ์ปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยง่าย เว้นแต่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารอินทรีย์ระเหยง่ายในภาชนะที่วัดโดย POLI MP400P อยู่ในช่วง 30 - 35 ppm ในการทำการวัดปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่าย โดยการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการทำการทดลองโดยควบคุมความชื้นของกระแสอากาศให้มีค่าเท่ากับ 100 % และทำการแปรค่าอุณหภูมิ ส่วนที่สองเป็นการควบคุมอุณหภูมิให้มีค่าเท่ากับ 31 องศาเซลเซียส และทำการแปรผันความชื้นในกระแสอากาศ สำหรับการควบคุมอุณหภูมิทำในพื้นที่ปิดเพื่อลดการถ่ายเทความร้อน และมีการเปิดเครื่องปรับอากาศเพื่อควบคุมอุณหภูมิ

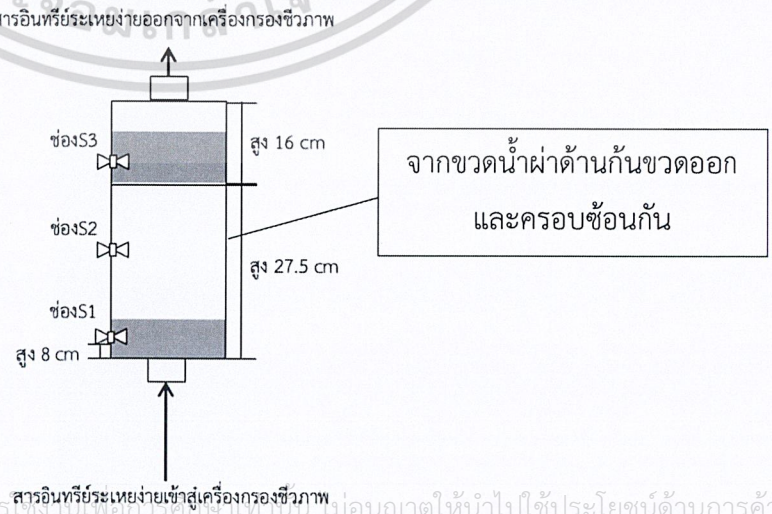
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก. เครื่อง Xiaomi Mijia Air Detector ข. เครื่อง POLI MP400P

รูปที่ 3.2 เครื่องมือวัดความเข้มข้นสารอินทรีย์ระเหยง่าย

3.2.4 เครื่องกรองชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการ

เครื่องกรองชีวภาพในการทดลองนี้เป็นระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory Scale) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ทำจากขวดน้ำขนาด 6 ลิตร ผ่าด้านก้นขวดออก และครอบซ้อนกันให้ส่วนของปากขวดน้ำเป็นส่วนที่สารอินทรีย์ระเหยง่ายเข้า - ออกจากเครื่องกรองชีวภาพ มีปริมาตร 10.35 ลิตร โดยมีการแบ่งการบรรจุตัวกลางออกเป็น 2 ชั้น ชั้นล่างเป็นการบรรจุตัวกลางผสม (ปุ๋ยหมัก, ปุ๋ยมูลไก่, กาบมะพร้าว, ไบโอมีเดีย) ชั้นบนเป็นการบรรจุตัวกลางประเภทถ่านกัมมันต์ (อัตราส่วนการผสมตัวกลางดังแสดงในตารางที่ 3.3) เครื่องกรองชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการมีจุดที่กระแสอากาศเข้าสู่เครื่องกรองชีวภาพ และออกจากเครื่องกรองชีวภาพของสารอินทรีย์ระเหยง่ายสูงจากพื้น 0.13 เมตร 0.55 เมตร ตามลำดับ มีช่องสำหรับวัดพารามิเตอร์ทั่วไปคือช่อง S_1 และ S_3 ที่ระดับความสูง 0.15 และ 0.36 เมตรจากคอขวดด้านล่าง และจุดเพิ่มความชื้นให้แก่ตัวกลางคือช่อง S_2 ที่ระดับความสูง 0.28 เมตรจากคอขวดด้านล่าง โดยปล่อยอากาศที่ปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยง่ายเข้าสู่ด้านล่างของเครื่องกรองชีวภาพ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.3 แผนภาพเครื่องกรองชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการ

3.2.5 ประเภทและอัตราส่วนผสมของวัสดุตัวกลาง

การวิจัยนี้ใช้วัสดุตัวกลางที่มีอัตราส่วนของตัวกลางหลักต่อตัวกลางเสริมเท่ากับ 60 : 40 ดังแสดงในตารางที่ 3.3 กำหนดปริมาตรตัวกลางเท่ากับ 3.84 ลิตร

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนผสมตัวกลางของแต่ละชุดการทดลอง

ตัวอย่าง	ชุดการทดลอง	สัดส่วนโดยปริมาตร(%)				
		ตัวกลางหลัก			วัสดุเสริม	
		ปุ๋ยหมัก	ปุ๋ยมูลไก่	ถ่านกัมมันต์	กาบมะพร้าว	ไบโอมีเดีย
ปุ๋ยหมัก	CC	30	-	30	20	20
	TC_1	30	-	30	20	20
	TC_2	30	-	30	20	20
ปุ๋ยมูลไก่	MC	-	30	30	20	20
	TM_1	-	30	30	20	20
	TM_2	-	30	30	20	20
ปุ๋ยผสม	CMC	20	20	20	20	20
	TCM_1	20	20	20	20	20
	TMC_2	20	20	20	20	20

หมายเหตุ: อัตราส่วนของตัวกลางหลักและตัวกลางเสริม (60 : 40) ที่ใช้ในงานวิจัยใช้ตามงานวิจัยเอกชัย (2547)

3.2.6 วัสดุที่ใช้เป็นตัวกลางหลักในการทดลอง

วัสดุตัวกลางหลักที่ใช้ในเครื่องกรองชีวภาพเป็นวัสดุตัวกลางที่มีประชากรจุลินทรีย์ และมีความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่าย โดยตัวกลางหลักที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.4 ได้แก่

ปุ๋ยหมักเป็นวัสดุตัวกลางที่มีจุลินทรีย์หนาแน่น และหลากหลายตลอดจนมีคุณสมบัติกักเก็บน้ำได้ดี ทั้งยังมีค่าความเป็นกรด – ด่างเป็นกลาง และมีปริมาณสารอินทรีย์ที่เหมาะสม

ปุ๋ยมูลไก่ เป็นวัสดุตัวกลางที่ใช้เป็นแหล่งอาหารสำหรับจุลินทรีย์ในกรณีทำการหยุดเดินระบบในวันหยุดสุดสัปดาห์ หรือซ่อมแซมระบบ

ถ่านกัมมันต์ เป็นวัสดุตัวกลางที่มีขนาดอนุภาคสม่ำเสมอ มีความคงทนต่อการแตกหัก และมีสมบัติในการดูดซับสารมลพิษ และน้ำได้สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก. ปุ๋ยหมัก ข. ปุ๋ยมูลไก่ ค. ถ่านกัมมันต์.

รูปที่ 3.4 วัสดุที่ใช้เป็นตัวกลางหลัก

3.2.7 วัสดุที่ใช้เป็นตัวกลางเสริมในการทดลอง

ตัวกลางเสริมที่ใช้ในการทดลองเป็นตัวกลางที่มีความสามารถในการเพิ่มความพรุน เป็นตัวกลางที่ช่วยลดการทรุดตัวของตัวกลางในเครื่องกรองชีวภาพ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยตัวกลางเสริมได้แก่

กาบมะพร้าว ใช้เป็นตัวเพิ่มความพรุน ช่วยป้องกันการทรุดตัว และป้องกันการอัดตัวของชั้นตัวกลาง ซึ่งกาบมะพร้าวที่ใช้มีลักษณะรูปทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ 1 - 2 เซนติเมตร

ไบโอมีเดีย เป็นตัวกลางที่ทำหน้าที่ให้จุลินทรีย์ยึดเกาะ หรือเรียกว่า Packing Media โดยไบโอมีเดียเป็นมีฟิล์มจุลินทรีย์เกาะบนวัสดุอนินทรีย์ที่สามารถนำไปแช่ในหัวเชื้อจุลินทรีย์เพื่อให้จุลินทรีย์สร้างฟิล์มชีวภาพ (Biofilm) ซึ่งทำให้สามารถบำบัดสารมลพิษได้ดีขึ้น

ก. กาบมะพร้าว ข. ไบโอมีเดีย

รูปที่ 3.5 วัสดุที่ใช้เป็นตัวกลางเสริม

3.2.8 การทดลองประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายแบบไม่ต่อเนื่อง

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพ โดยศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อจุลินทรีย์ในเครื่องกรองชีวภาพ ค่าตัวแปรต่างๆที่พิจารณาในการทดลองมีดังนี้ในการทำการทดลองมีการเดินระบบ 6 ชั่วโมงต่อวัน เป็นเวลา 5 วันต่อสัปดาห์ เพื่อเป็นการให้ออกซิเจนกับจุลินทรีย์ โดยมีอัตราการไหลของอากาศ 724.09 – 1,589.60 มิลลิลิตรต่อนาที ทำการจำลองสถานการณ์ที่มีสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศ โดยแปรความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่าย 1.2, 2.0 และ 4.0 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้อัตราการไหล 5.74 ลิตรต่อนาที และเวลากักพักที่ 60 วินาที และปล่อยอากาศเข้าสู่ระบบเป็นครั้ง ๆ ไป เป็นเวลา 20 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพ เพื่อบำบัดปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศ และศึกษาเปรียบเทียบวัสดุตัวกลางที่เหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย รวมไปถึงพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องกรองชีวภาพ

4.1 คุณสมบัติของวัสดุตัวกลาง

การดำเนินการวิจัยครั้งนี้เลือกใช้วัสดุตัวกลางหลักทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยมูลไก่ กาบมะพร้าว ส่วนวัสดุเสริมตัวกลางหลักที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ และไบโอมีเดีย ซึ่งได้เลือกศึกษาคุณสมบัติของวัสดุตัวกลางหลัก และวัสดุเสริมตามความเหมาะสมในการนำมาใช้งานกับเครื่องกรองชีวภาพ

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของตัวกลางหลัก

พารามิเตอร์	คุณสมบัติของตัวกลางหลัก		
	ปุ๋ยหมัก ($\overline{X} \pm SD$)	ปุ๋ยมูลไก่ ($\overline{X} \pm SD$)	ค่าที่แนะนำ
ความหนาแน่น (g/cm^3)	0.40	0.69	-
ความพรุน %	56.82	53.41	40 – 80 %
pH	7.79	6.91	6 – 8
อินทรียวัตถุ %	22.41	46.43	> 55 %
N %	0.40	0.89	0.4 %
P %	0.02	0.12	0.15 %
K %	0.26	0.77	0.15 %

หมายเหตุ * ค่าที่แนะนำมาจาก Devniny et al., 1999

4.1.1 ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่นของวัสดุตัวกลางหลักเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการพิจารณาออกแบบโครงสร้างรองรับตัวกลาง จากการทดสอบคุณสมบัติวัสดุตัวกลางพบว่าตัวกลางหลัก ปุ๋ยหมัก และปุ๋ยมูลไก่ มีความหนาแน่นประมาณ 0.40 และ 0.69 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรตามลำดับ ซึ่งจำเป็นต้องมีตัวกลางเสริม จึงมีการเติมกาบมะพร้าวเพื่อเป็นการเพิ่มความพรุน และป้องกันการกดทับของตัวกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และให้มีออกซิเจนแทรกตามรูพรุน ดังนั้นจึงทำให้อายุการใช้งานของตัวกลางสามารถใช้งานได้นานมากขึ้น

4.1.2 ความพรุน (Porosity)

ความพรุนเป็นพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการกระจายตัวของอากาศ วัสดุตัวกลางที่มีความพรุนสูงมีข้อดีคือ ทำให้อากาศสามารถกระจายตัวได้ดี ทำให้สารอินทรีย์ระเหยง่ายได้สัมผัสกับฟิล์มชีวภาพได้สูงขึ้น และทำให้เกิดการสูญเสียความดันน้อย (Head Loss) ข้อเสียคือ อาจมีการทรุดตัวในภายหลัง งานวิจัยที่ผ่านมาแนะนำให้เลือกใช้ตัวกลางที่มีความพรุนประมาณ 40 - 80 เปอร์เซ็นต์ (Devinny et al., 1999) จากผลการทดลองพบว่าตัวกลางปุ๋ยหมักมีความพรุน 56.82 เปอร์เซ็นต์ และ ปุ๋ยมูลไก่ 53.41 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ อยู่ในช่วงค่าที่แนะนำจึงมีความพรุนที่เหมาะสมในการนำมาใช้เป็นวัสดุตัวกลาง

4.1.3 ความชื้น (Moisture Content)

ความชื้นเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดในระบบของเครื่องกรองชีวภาพ เนื่องจากความชื้นช่วยในการละลายมลพิษ และธาตุอาหารไว้สำหรับจุลินทรีย์ในการดำรงชีวิต และกิจกรรมจุลชีพในระบบ โดยค่าความชื้นตัวกลางที่เหมาะสมมีค่าประมาณ 40 - 80 เปอร์เซ็นต์ (Devinny et al., 1999) ซึ่งจำเป็นต้องมีการเพิ่มความชื้นให้กับตัวกลางก่อนการเดินระบบเพื่อให้ความชื้นของตัวกลางอยู่ในช่วงที่เหมาะสมประมาณ 40 – 80 % ในการทดลองเพื่อให้ความชื้นของตัวกลางอยู่ในค่าที่เหมาะสม ดังนั้นช่วงเวลาที่มีการหยุดเดินระบบจะต้องมีการปิดช่องทางเข้า และทางออกของเครื่องกรองชีวภาพเพื่อให้ระบบในเครื่องกรองชีวภาพเป็นระบบปิดเพื่อรักษาความชื้นในเครื่องกรองชีวภาพให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม

4.1.4 ความเป็นกรด - ด่าง (pH)

ความเป็นกรด - ด่างมีผลต่อการดำเนินงานของเครื่องกรองชีวภาพเพราะจุลินทรีย์จะเจริญได้ดีในสภาพเป็นกลาง โดยจุลินทรีย์ส่วนใหญ่ทำงานได้ดีที่ค่าความเป็นกรด - ด่างประมาณ 6 - 8 (Devinny et al., 1999) ผลการวิเคราะห์ตัวกลางทั้ง 2 ประเภท พบว่าตัวกลางปุ๋ยหมัก และปุ๋ยมูลไก่มีความเป็นกรด – ด่าง อยู่ในช่วงค่าที่แนะนำ เหมาะสมที่จะนำมาใช้งาน

4.1.5 อินทรียวัตถุ (Organic Matter)

ปริมาณอินทรียวัตถุในตัวกลางมีความจำเป็นสำหรับระบบที่ทำงานไม่ต่อเนื่อง หรือหยุดในบางช่วงเวลา ปกติจุลินทรีย์ใช้สารมลพิษเป็นแหล่งพลังงานในการเจริญเติบโต หากระบบหยุดการทำงานในบางช่วงเวลาจุลินทรีย์จะใช้สารอินทรีย์จากตัวกลางแทน Leson and Winer, 1991 ได้กล่าวว่าตัวกลางควรมีปริมาณอินทรียวัตถุมากกว่า 55 เปอร์เซ็นต์ ผลการทดลองพบว่าชุดทดลองที่ประกอบด้วยตัวกลางหลัก คือ ปุ๋ยหมัก และปุ๋ยมูลไก่ มีปริมาณอินทรียวัตถุอยู่ในช่วง 20 - 50 % ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้อยกว่าเกณฑ์ที่ได้แนะนำไว้เล็กน้อย ดังนั้นในการทดลองจึงมีการเติมสารอาหารในเครื่องกรองชีวภาพ เพื่อเป็นการเพิ่มอินทรียวัตถุให้กับระบบ

4.1.6 ปริมาณธาตุอาหารของปุ๋ยหมักและปุ๋ยมูลไก่

การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์จำเป็นต้องใช้ธาตุอาหารประเภท ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ประมาณ 0.4, 0.15 และ 0.15 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ (Devinny et al., 1999) ผลการทดลองพบว่ามีไนโตรเจน และโพแทสเซียมอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม ส่วนธาตุฟอสฟอรัสของตัวกลางทั้งสองชนิดมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่เหมาะสม โดยการวิเคราะห์ปริมาณ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส มีผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.1

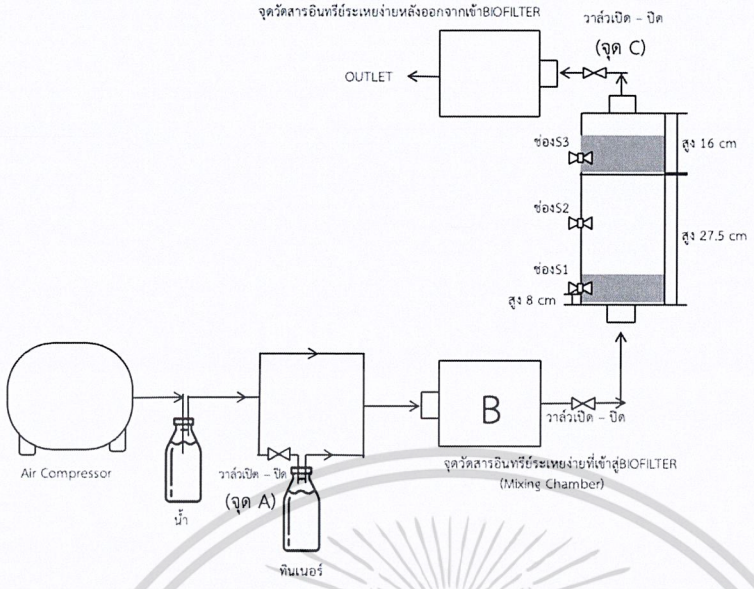
จากผลของคุณสมบัติตัวกลาง คุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางเคมีของตัวกลางแต่ละชนิดที่เลือกใช้โดยทั่วไปมีค่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสม แต่อาจมีสมบัติทางกายภาพบางประการที่ต้องทำการปรับปรุงเพื่อให้เหมาะสมสำหรับการดำเนินระบบ เช่น การเติมน้ำให้กับตัวกลางเพื่อเป็นความชื้นให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม เติมปริมาณธาตุอาหารของปุ๋ยหมัก และปุ๋ยมูลไก่ เป็นต้น

4.2 ผลการจำลองสถานการณ์และการเทียบเครื่องมือวัด

4.2.1 การจำลองสถานการณ์ปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยง่าย

การจำลองสถานการณ์ปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยง่าย พบว่าสามารถควบคุมความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้ การทดลองในครั้งนี้ทำโดยการพ่นอากาศที่มีอัตราการไหลของอากาศ 5.742 ลิตรต่อนาที เข้าสู่ขวดที่บรรจุน้ำ และเปิดวาล์ว (จุด A) ให้อากาศเข้าสู่ขวดที่บรรจุทินเนอร์ 1 มิลลิลิตร จากนั้นทำการปิดวาล์ว (จุด A) เจือจางความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่ายใน Mixing Chamber ซึ่งเป็นจุดวัดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่าย จากนั้นเมื่อได้ความเข้มข้นที่ต้องการให้เปิดวาล์ว (จุด B) พ่นอากาศที่มีสารอินทรีย์ระเหยง่ายปนเปื้อนเข้าสู่เครื่องกรองชีวภาพ เมื่ออากาศไหลของจาก Mixed Chamber จนหมดจะทำการปิดวาล์ว (จุด B) และกักอากาศในเครื่องกรองชีวภาพเป็นเวลา 60 วินาที จากนั้นเปิดวาล์วที่จุดB และ C เพื่อไล่อากาศทั้งหมดเข้าสู่ จุดวัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายหลังจากออกจากเครื่องกรองชีวภาพ โดยเครื่องกรองชีวภาพมีกลไกการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 4.1

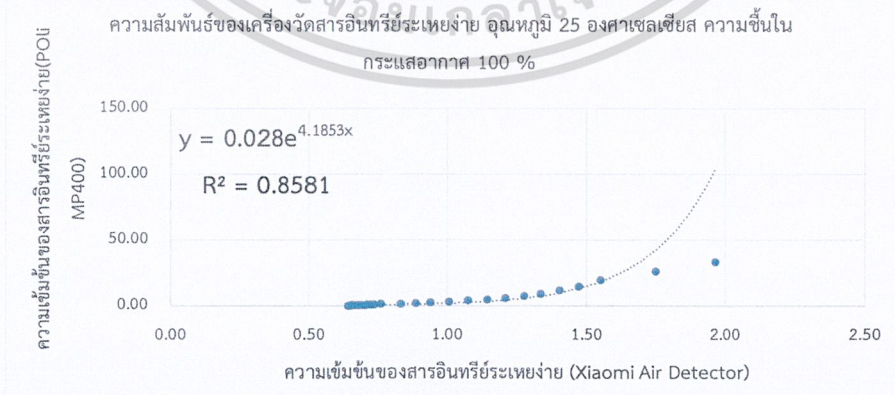
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 กลไกการทำงานของเครื่องกรองชีวภาพ

4.2.2 การเทียบเครื่องมือวัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย

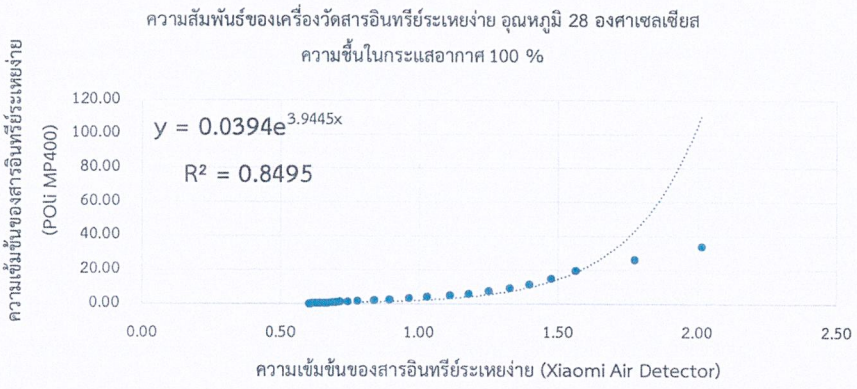
การทดลองนี้มีการใช้เครื่องมือวัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย 2 เครื่อง ได้แก่ เครื่อง Multi - Gas Monitors USA. ยี่ห้อ mPower (Model : POLI MP400P) และเครื่อง Xiaomi Mijia Air Detector โดยผลการเปรียบเทียบเครื่องวัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายทั้งสองเครื่อง โดยทำการควบคุมความชื้นในกระแสอากาศแปรผันอุณหภูมิ และควบคุมอุณหภูมิแปรผันความชื้นในกระแสอากาศ พบว่า การที่อุณหภูมิ และความชื้นในกระแสอากาศเปลี่ยนแปลงส่งผลการวัดค่าสารอินทรีย์ระเหยง่ายของเครื่องวัดทั้ง 2 เครื่อง ดังนั้นการทดลองนี้จึงเลือกใช้สมการจากกราฟรูปที่ 4.2 ค. $Y = 0.097e^{3.3535x}$ $R^2 = 0.9443$ เนื่องจากเป็นสภาวะที่ใกล้เคียงกับสภาวะในการทดลองมากที่สุด



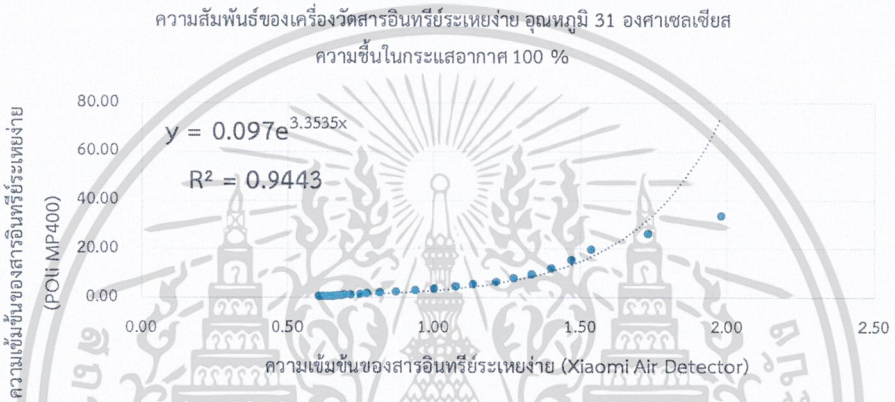
ก. ความสัมพันธ์ของค่าVOCs จากเครื่องวัดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบเครื่องมือวัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในสภาวะต่างๆ

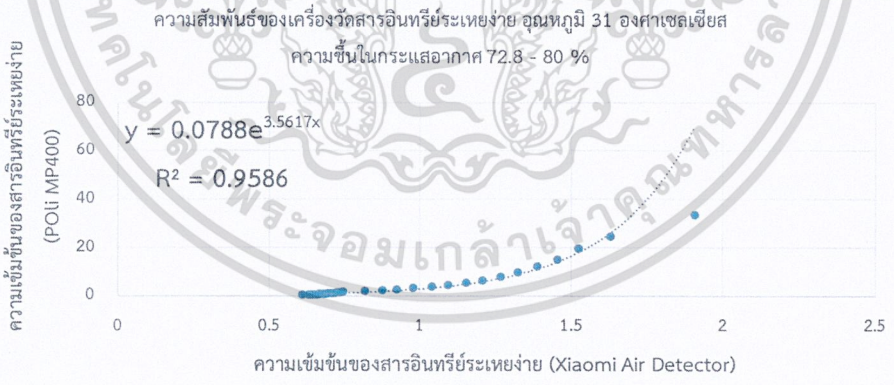
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข. ความสัมพันธ์ของค่า VOCs จากเครื่องวัดที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส



ค. ความสัมพันธ์ของค่า VOCs จากเครื่องวัดที่ความชื้นในกระแสอากาศ 100%



ง. ความสัมพันธ์ของค่า VOCs จากเครื่องวัดที่ความชื้นในกระแสอากาศ 72.8 – 80%

รูปที่ 4.2 (ต่อ) การเปรียบเทียบเครื่องมือวัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในสภาวะต่างๆ

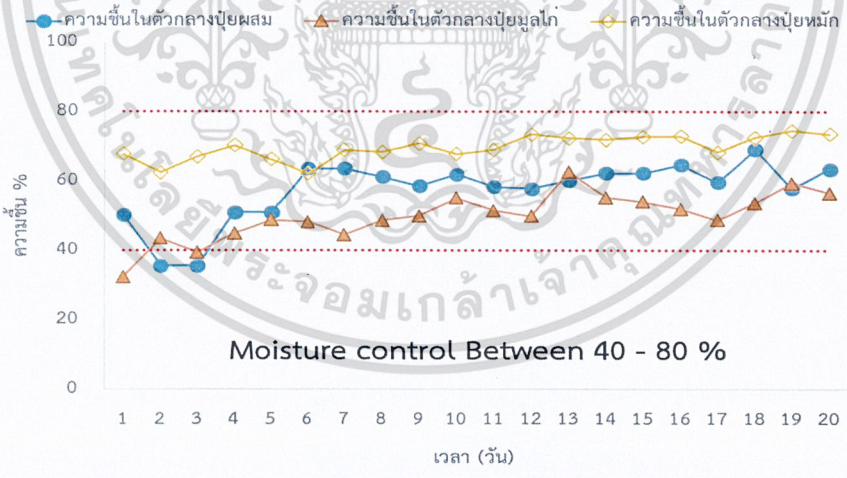
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลของตัวกลางและตัวแปรที่เหมาะสม

4.3.1 ความชื้นสัมพัทธ์และความชื้นของตัวกลาง

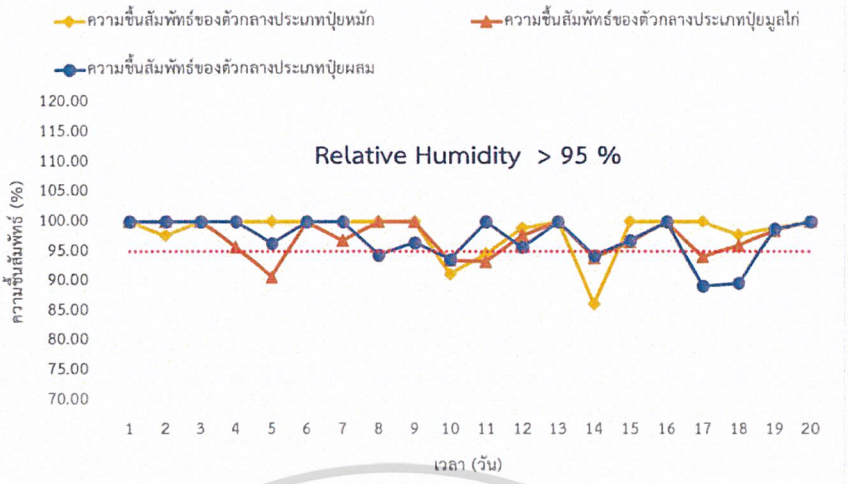
ความชื้นเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในเครื่องกรองชีวภาพ เนื่องจากจุลินทรีย์ต้องมีการใช้ความชื้นในการทำงาน และการดำรงชีพ โดยระดับความชื้นของตัวกลางที่เหมาะสมในเครื่องกรองชีวภาพมีค่าประมาณ 40 - 80 % (Devinny et al.,1999) ในการควบคุมความชื้นนั้นทำได้ 2 วิธี คือ การควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ในกระแสที่อากาศที่เข้าระบบให้สูงกว่า 95 % (Schnelle and Brown, 2000) และการเติมน้ำที่ผิวหน้าของชั้นตัวกลาง ซึ่งการทดลองในครั้งนี้ได้มีการเพิ่มความชื้นให้กับตัวกลางทั้ง 2 วิธี

การแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของชั้นตัวกลาง และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่เข้าสู่ระบบกับการระยะเวลาการเดินระบบของตัวกลางทั้ง 3 ประเภทดังแสดงในรูปที่ 4.3 โดยในการทดลองจะมีการรักษาความชื้นของชั้นตัวกลางอยู่ที่ 40 – 80 เปอร์เซ็นต์ พบว่าตัวกลางปุ๋ยหมักสามารถทำการควบคุมความชื้นของชั้นตัวกลางได้ง่าย เนื่องจากปุ๋ยหมักมีความพรุน ส่วนตัวกลางประเภทปุ๋ยมูลไก่ และปุ๋ยผสม ในช่วงต้นของการเดินระบบมีการควบคุมความชื้นได้ยาก แต่ก็สามารถควบคุมความชื้นให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมได้ นอกจากนี้ยังมีการเพิ่มความชื้นให้กับตัวกลางโดยการให้กระแสอากาศที่เข้าไปในเครื่องกรองชีวภาพมีความชื้นของกระแสอากาศมากกว่า 95 % ดังแสดงในรูปที่ 4.4 จะพบว่าความชื้นของกระแสอากาศที่เข้าสู่เครื่องกรองชีวภาพส่วนใหญ่มีค่ามากกว่า 95 %

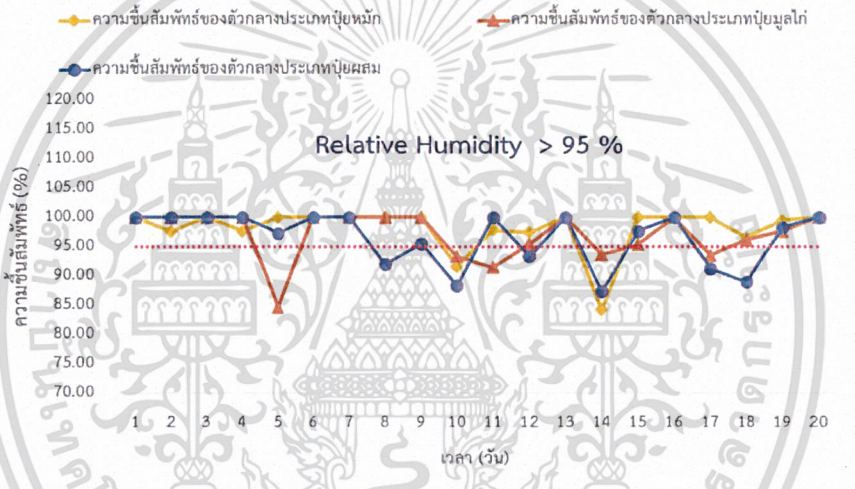


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของตัวกลางทั้ง 3 ประเภทในช่วงระยะเวลาที่เดินระบบ

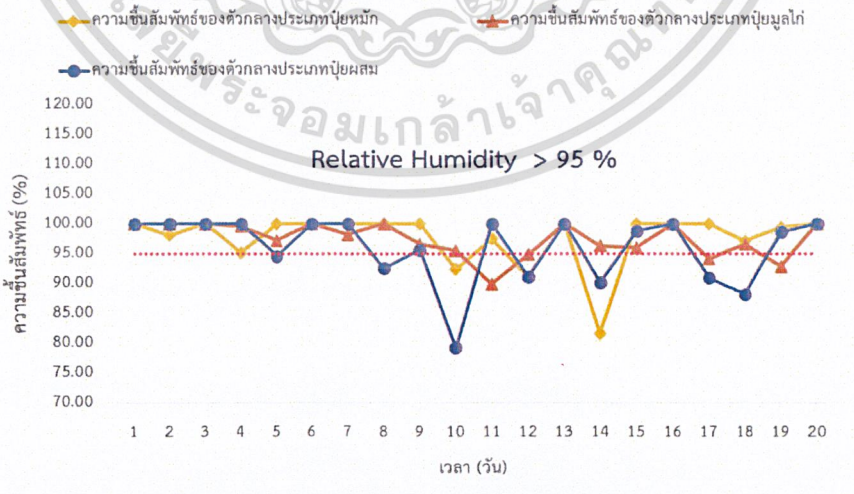
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก. ความชื้นสัมพัทธ์ของตัวกลางที่ความเข้มข้น 1.2 ppm



ข. ความชื้นสัมพัทธ์ของตัวกลางที่ความเข้มข้น 2.0 ppm



ค. ความชื้นสัมพัทธ์ของตัวกลางที่ความเข้มข้น 4.0 ppm

รูปที่ 4.4 ความชื้นสัมพัทธ์ของตัวกลางที่ความเข้มข้นต่างๆในระยะเวลาที่เดินระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ความเป็นกรด – ด่างของชั้นตัวกลาง

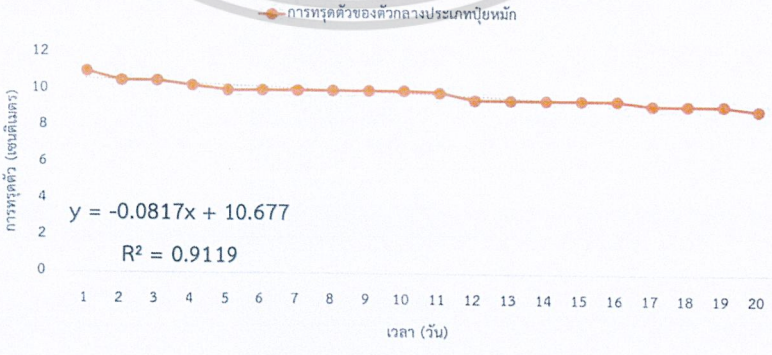
กิจกรรมส่วนใหญ่ของจุลินทรีย์มีค่าความเป็นกรด - ด่างของตัวกลางที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 6 - 8 (Devinny et al., 1999) โดยการย่อยสลายทางชีวภาพของจุลินทรีย์ทำให้เกิดสารที่เป็นกรดทำให้ค่าความเป็นกรด – ด่างของวัสดุตัวกลางลดลง ซึ่งการเติมเปลือกหอยให้กับระบบมีส่วนช่วยในทำให้ค่าความเป็นกรด - ด่างในชั้นตัวกลางมีค่าอยู่ในช่วง 6 – 8 จากการทดลองพบว่าค่าความเป็นกรด – ด่างของตัวกลางทั้ง 3 ประเภทอยู่ในช่วงที่เหมาะสมคือ 6 – 8 (ค่าความเป็นกรด – ด่างของตัวกลางดังแสดงในตารางที่ ค - 4)

4.3.3 อุณหภูมิของชั้นตัวกลาง

อุณหภูมิของชั้นตัวกลางในเครื่องกรองชีวภาพแต่ละชุดการทดลองตลอดระยะเวลาการเดินระบบ จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิของเครื่องกรองชีวภาพแต่ละชุดการทดลองมีอุณหภูมิแปรผันอยู่ที่ 26 – 31.5 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิของชั้นตัวกลางดังแสดงในตารางที่ ค - 5) ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อเครื่องกรองชีวภาพมีค่าอยู่ในช่วง 20 – 30 องศาเซลเซียส (Diks and Ottengraf, 1991) แต่อย่างไรก็ตามควรหลีกเลี่ยงไม่ให้อุณหภูมิเกิน 40 องศาเซลเซียส เนื่องจากอาจจะทำให้จุลินทรีย์ตายได้ (Leson and Winer, 1991) ดังนั้นอุณหภูมิของตัวกลางในขณะทดลองอยู่ในช่วงที่เหมาะสม

4.3.4 การทรุดตัวของชั้นตัวกลาง

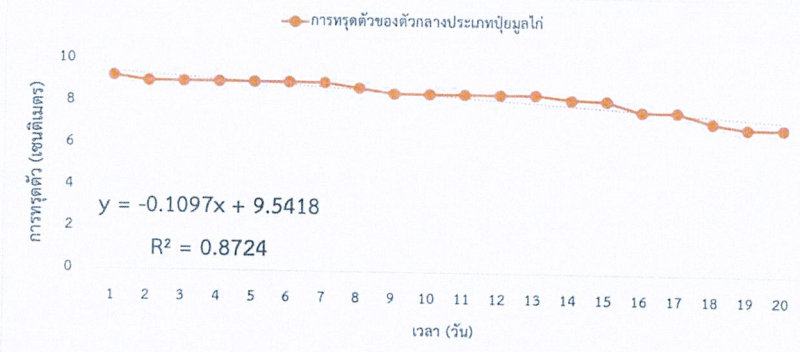
จากการทดลองพบว่าเครื่องกรองชีวภาพแต่ละชุดการทดลองมีการทรุดตัวของชั้นตัวกลาง ซึ่งชั้นตัวกลางที่มีการทรุดตัวมากที่สุดคือ ปุ๋ยมูลไก่ เนื่องจากปุ๋ยมูลไก่มีความหนาแน่นมาก จึงทำให้มีการทรุดตัวของชั้นตัวกลางมาก การที่ตัวกลางในระบบกรองชีวภาพมีการทรุดตัวจะส่งผลให้กระแสอากาศสามารถไหลผ่านตัวกลางได้ยาก อาจทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในเครื่องกรองชีวภาพมีประสิทธิภาพการบำบัดลดลง และนอกจากนี้การทรุดตัวของตัวกลางในเครื่องกรองชีวภาพยังอาจส่งผลให้เกิดการอัดแน่นของตัวกลางซึ่งอาจทำให้บางส่วนของเครื่องกรองชีวภาพมีสภาวะไร้อากาศซึ่งอาจส่งผลให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้



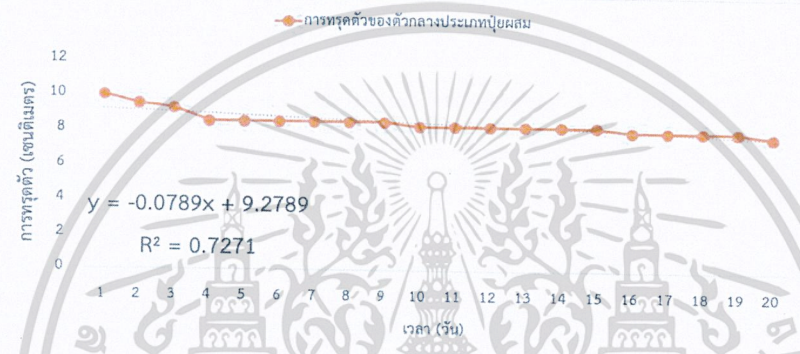
ก. การทรุดตัวของตัวกลางประเภทปุ๋ยหมัก

รูปที่ 4.5 การทรุดตัวของตัวกลางประเภทต่าง ๆ ในระยะเวลาที่เดินระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข. การทรุดตัวของตัวกลางประเภทปุ๋ยมูลไก่



ค. การทรุดตัวของตัวกลางประเภทปุ๋ยผสม

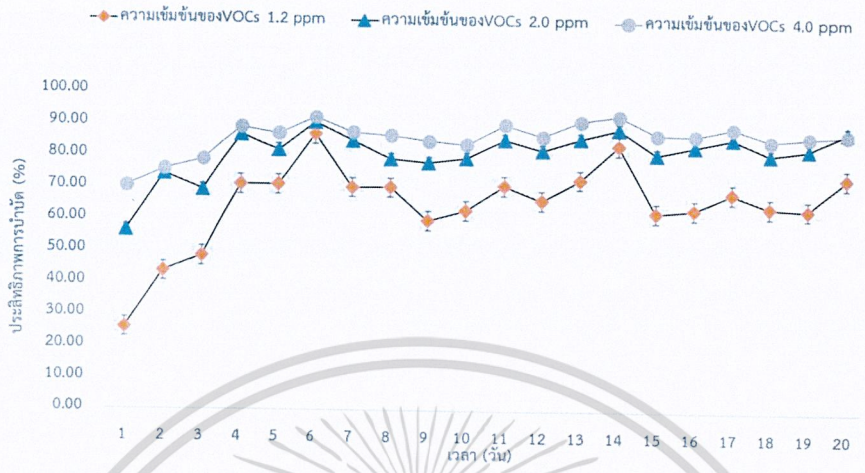
รูปที่ 4.5 (ต่อ) การทรุดตัวของตัวกลางประเภทต่างๆในระยะเวลาที่เดินระบบ

4.3.5 ประสิทธิภาพการบำบัด

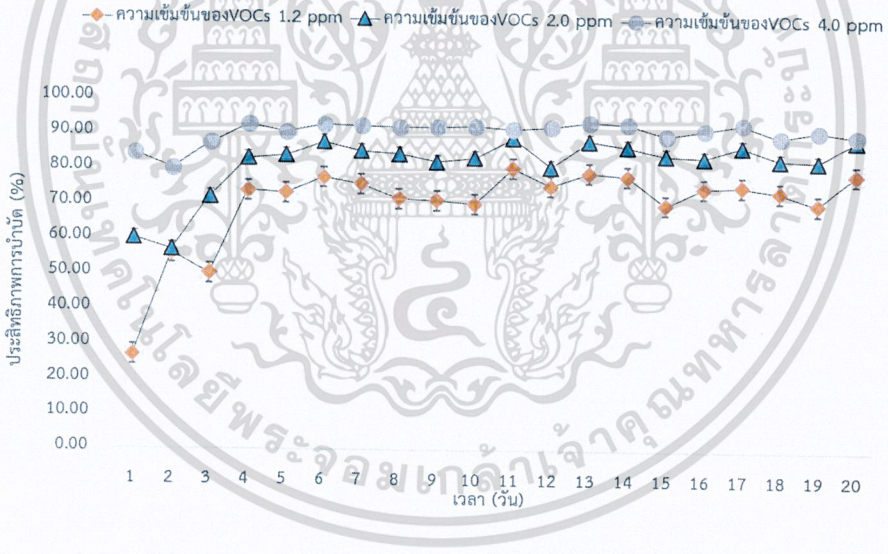
การศึกษาชุดควบคุมของเครื่องกรองชีวภาพที่ใช้ปุ๋ยหมัก (Compost Control Set, CC) ปุ๋ยมูลไก่ (Manure Control Set, MC) และปุ๋ยผสม (Compost and Manure Control Set, CMC) โดยการทำการทดลองเช่นเดียวกับชุดการทดลอง เว้นแต่ไม่มีการให้สารอินทรีย์ระเหยง่ายในชุดควบคุม พบว่าไม่มีสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกิดขึ้นจากตัวกลางหรือย่อยสลายออกมาในสภาวะไร้อากาศ (Anareobic Degradation) (ผลการทดลองดังแสดงในภาคผนวก ง.) ดังนั้นสามารถบอกว่าได้ว่าแต่ละชุดการทดลองมีสภาวะอากาศเพียงพอ และไม่มีสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกิดขึ้นนจากตัวกลาง จากการศึกษาตัวกลางและตัวแปรที่เหมาะสมในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายมีการแปรผันความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่ายตั้งแต่ 1.2, 2.0 และ 4.0 ส่วนในล้านส่วน อัตราการไหลของอากาศ 5.74 ลิตรต่อนาที และเวลากักพักเท่ากับ 60 วินาที ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่าย และประสิทธิภาพการบำบัดดังแสดงในรูปที่ 4.6 - 4.8 พบว่าเมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่าย ประสิทธิภาพการบำบัดจะมีค่าสูงขึ้น แต่ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ใช้ในการทดลองมีความเข้มข้นต่ำ ทำให้มีประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีเนื่องจากเครื่องกรอง

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชีวภาพเหมาะสมกับการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่มีความเข้มข้นต่ำ (ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายแสดงดัง ภาคผนวก ค.)

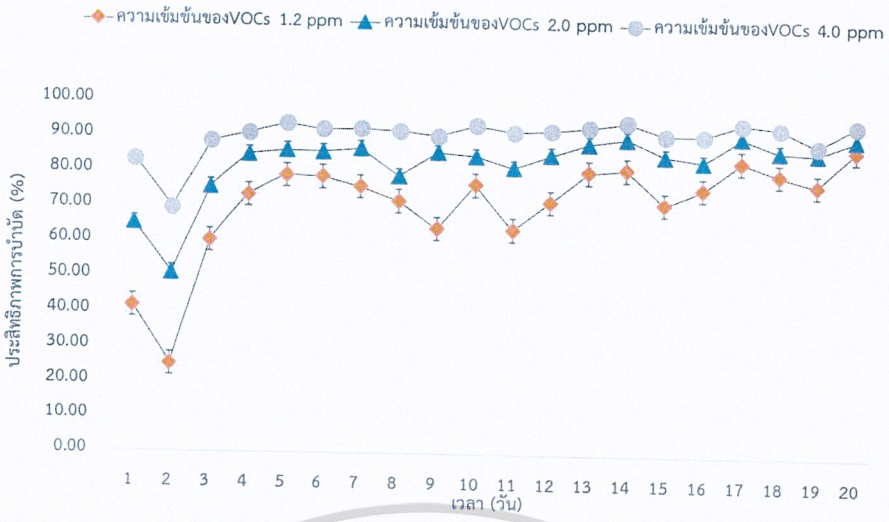


รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพการบำบัด VOCs ตัวกลางปุ๋ยหมัก



รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพการบำบัด VOCs ตัวกลางปุ๋ยมูลไก่

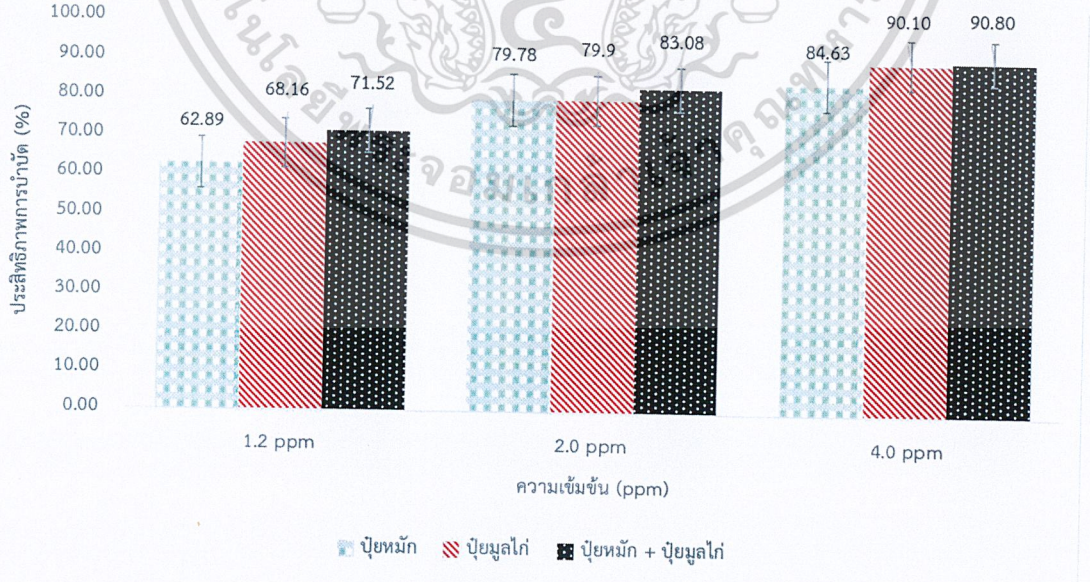
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพการบำบัด VOCs ตัวกลางปุ๋ยหมักผสม

4.3.6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวกลางทั้ง 3 ประเภท

การทำงานของเครื่องกรองชีวภาพที่มีตัวกลางที่แตกต่างกันคือ ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยมูลไก่ และปุ๋ยผสมระหว่างปุ๋ยหมักและปุ๋ยมูลไก่ ตามลำดับ การทำงานของเครื่องกรองชีวภาพเมื่อเริ่มต้นเดินระบบในช่วงแรกของกลไกการกรองทางชีวภาพเป็นการดูดซับ และการดูดซึม ซึ่งตัวกลางที่ใช้ต้องมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากเพื่อใช้เป็นที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์ เมื่อพิจารณาตัวกลางทั้ง 3 ชนิด พบว่าในช่วงเริ่มต้นประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายค่อนข้างแปรผัน เนื่องจากอยู่ในช่วงการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ โดยจากการทดลองพบว่าตัวกลางที่มีประสิทธิภาพการบำบัดที่เหมาะสมคือปุ๋ยผสมดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายของตัวกลางทั้ง 3 ประเภท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากปุ๋ยหมักมีความพรุนถ่ายเทอากาศได้ดี จุลินทรีย์สามารถทำงานได้ปกติ และปุ๋ยมูลไก่มีธาตุอาหารมาก จุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตได้ดีจึงมีประสิทธิภาพการบำบัดดีที่สุด อย่างไรก็ตามการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายโดยเครื่องกรองชีวภาพต้องมีการควบคุมความชื้นให้เหมาะสม เนื่องจากการที่มีความชื้นในตัวกลางมากเกินไปอาจทำให้เกิดสภาวะไร้อากาศ ซึ่งจุลินทรีย์ในเครื่องกรองชีวภาพส่วนใหญ่เป็นจุลินทรีย์ที่ต้องใช้อากาศในการย่อยสารมลพิษ การที่มีความชื้นมากเกินอาจทำให้เกิดกลิ่นซึ่งเกิดจากผลิตภัณฑ์การย่อยสลายสภาวะไร้อากาศ เช่น สารไฮโดรเจนซัลไฟด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการวิจัยในเรื่องการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพที่ใช้ตัวกลางประเภทต่างๆในครั้งนี้สามารถสรุปผลงานวิจัย และมีข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายของเครื่องกรองชีวภาพ รวมถึงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยเครื่องกรองชีวภาพ และตัวกลางที่เหมาะสม สามารถสรุปเป็นหัวข้อต่าง ๆ ได้ดังนี้

1) การทดลองใช้อัตราส่วนตัวกลางหลักต่อตัวกลางเสริมคือ 60 : 40 โดยปริมาตร พบว่าตัวกลางทั้ง 3 ประเภทมีประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่าย
2) การทดลองใช้ตัวกลางหลัก 3 ประเภท ได้แก่ ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยมูลไก่ และ ปุ๋ยผสม มีการควบคุมพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมในการกรองชีวภาพ พบว่าตัวกลางที่เหมาะสมที่สุดในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายคือ ปุ๋ยผสม โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดในทุก ๆ ความเข้มข้น โดยที่ความเข้มข้นเท่ากับ 1.2 2.0 4.0 ส่วนในล้านส่วน ประสิทธิภาพในการบำบัดเท่ากับ 71.52, 83.08 และ 90.82 % ตามลำดับ
3) ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของทางกายภาพของเครื่องกรองชีวภาพ วัสดุตัวกลางที่มีความสามารถเก็บกักความชื้นได้ดีมีผลดีต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย
4) การสร้าง และการเดินระบบ สะดวก ง่าย ค่าใช้จ่ายต่ำ

5.2 ข้อเสนอแนะ

เพื่อหาความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย ควรทำการศึกษาวิจัย ทดลองเดินระบบแบบต่อเนื่อง ศึกษาปัจจัยต่างๆที่เกิดจากการเดินระบบแบบต่อเนื่อง รวมทั้งค่าใช้จ่ายในการสร้าง และดูแลระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาที่ดิน. 2547. **คู่มือการวิเคราะห์ตัวอย่าง ดิน น้ำ ปุ๋ย พืช วัสดุปรับปรุงดิน และการวิเคราะห์เพื่อตรวจรับรองมาตรฐานสินค้า**. กรุงเทพฯ : สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน.

กรมพัฒนาที่ดิน. 2553. **คู่มือการปฏิบัติงานกระบวนการวิเคราะห์ตรวจสอบดินทางเคมี**. [Online]. เข้าถึงได้จาก : http://www.ldd.go.th/PMQA/2553/Manual/OSD-03.pdf

กระทรวงอุตสาหกรรม. 2012. **กำหนดหลักเกณฑ์ และวิธีการปฏิบัติในการตรวจสอบและควบคุมการรั่วซึมของสารอินทรีย์ระเหยจากอุปกรณ์ในโรงงานอุตสาหกรรม พ.ศ. ๒๕๕๕**. [Online]. เข้าถึงได้จาก : https://www.diw.go.th/hawk/news/fugitive%20voc.pdf

จิรวัฒน์ กันพยันต์. 2548. "**การบำบัดไออะซิโตนโดยการกรองทางชีวภาพ.**" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหามัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ณัฐพล รัตนมุขย์. 2549. "**การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยเครื่องกรองชีวภาพ.**" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหามัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พรรณวดี สุวัฒิกะ, เนตรนภา ช่างปัด, ปพน คงสุวรรณ และวงศ์พันธ์ ลิมปเสนีย์. 2018. "**การบำบัดไอระเหยตัวทำละลายอินทรีย์ด้วยเครื่องกรองชีวภาพ.**" วารสารวิทศาสตร์ประยุกต์. 17(1) : 51-63.

พัชราวดี สุวรรณธาดา. 2557. **ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศ**. [Online]. เข้าถึงได้จาก : http://infofile.pcd.go.th/air/250357_3.pdf

ศิริรัตน์ ศิริพรวิศาล. 2552. "**เทคโนโลยีไบโอฟิลเตอร์สำหรับการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย.**" วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 19(3) : 455-461.

เอกชัย เลิศผดุงวิทย์. 2547. "**การกำจัดไซลีนด้วยเครื่องกรองชีวภาพที่ใช้ตัวกลางผสม.**" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหามัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Alex De Visscher & Arindom Sen a Farzana Haque. 2011. "**FACTORS AFFECTING BIOFILTER PERFORMANCE FOR BTEX REMOVAL.**" Biofiltration for BTEX Removal. 2652-2665.

Bray II, R.H. and L.T. Kurtz. 1945. **Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils.**" Soil Sci. 59 : 39-45.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Bremner, J.M. 1965. **Methods of Soil Analysis Part 3 Chemical Methods.** [Online]. เข้าถึงได้จาก : https://www.waterboards.ca.gov/waterrights/water_issues/programs/bay_delta/california_waterfix/exhibits/docs/Islands/II_41.pdf

Daniel.Cardenas. 2010. **File:2005 sources of vocs.png.** [Online]. เข้าถึงได้จาก : https://en.wikipedia.org/wiki/File:2005_sources_of_vocs.png

Hinrich L. Bohn Mark Nelson. 2011. **"Soil-Based Biofiltration for Air Purification: Potentials for Environmental and Space Life Support."** Application. Journal of Environmental Protection., : 1084-1094.

Joseph S. Marc A. and Todd S. 1999. **BIOFILTRATION FOR AIR POLLUTION CONTROL. USA :** Taylor and Francis.

Kantikwang. 2012. **แหล่งกำเนิดของสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs).** [Online]. เข้าถึงได้จาก : http://kantikwang.blogspot.com/2012/02/vocs.html

Ki-Hyun Kim, Jan E. Szulejko, Sudhir Kumar Pandey Kumar Vikrant. 2017. **"Bio-filters for the Treatment of VOCs and Odors - A Review."** Asian Journal of Atmospheric Environment. : 139-153.

Peter Alan and Swaminathan. 2012. **"Biofiltration for treating VOCs: An overview."** Reviews in Environmental Science and Bio/Technology. : 231-242.

Rahul, Mathur Anil Kumar, Balomajumder Chandrajit and Thakur Prabhat Kumar. 2011. **"Biofiltration of Volatile Organic Compounds (VOCs) – An Overview."** Research Journal of Chemical Sciences. 1 : 83-92.

United States Environmental Protection Agency. 2019. **What is the definition of VOC?.** [Online]. เข้าถึงได้จาก : [ออนไลน์]: https://www.epa.gov/air-emissions-inventories/what-definition-voc

Walkley, A. and I.A. Black, 1947. **"Chromic acid titration method for determination of soil organic matter."** Soil. Sci. Amer. Proc. : 63-257.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
ขั้นตอนการทดสอบคุณสมบัติของตัวกลาง

ขั้นตอนการวิเคราะห์คุณสมบัติตัวกลาง

ก.1 วิธีวิเคราะห์ความหนาแน่นของตัวกลาง (JIS 1474 - 1976)

1) อบตัวอย่างให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น
2) ชั่งกระบอกตวง (10 มิลลิลิตร) ละเอียด 2 ตำแหน่งบันทึกเป็นน้ำหนัก X_0
3) ใส่ตัวอย่างในกระบอกจนเกือบเต็มกระแทกก้นกระบอกตวงบนแผ่นยางจนกระทั่งระดับตัวอย่างในกระบอกตวงคงที่
4) ถ้าระดับที่คงที่ไม่เท่ากับ 10 มิลลิลิตร ให้ตักตัวอย่างเข้าหรือออกจากกระบอกตวงแล้ว กระแทกก้นกระบอกตวงใหม่ จนกว่าที่จะได้ระดับคงที่เป็น 10 มิลลิเมตร
5) บันทึกน้ำหนักของตัวอย่างพร้อมกระบอกตวงเป็น X_1

การคำนวณ

$$BD\left(\frac{g}{cm^3}\right) = \frac{(X_1 - X_0)}{130} \qquad \text{ก.1}$$

ก.2 วิธีวิเคราะห์ความพรุนของวัสดุตัวกลาง

1) ใส่ตัวอย่างลงในกระบอกตวงจนเกือบเต็ม กระแทกก้นกระบอกตวงบนแผ่นยางจนกระทั่งระดับในกระบอกตวงคงที่ ถ้าระดับที่คงที่ไม่เท่ากับปริมาตรที่ต้องการให้ตักตัวอย่างเข้าหรือออกกระบอกตวงใหม่ จนกว่าจะได้ระดับที่คงที่ตรงกับปริมาตรที่ต้องการ
2) บันทึกน้ำหนักของตัวอย่างพร้อมกระบอกตวงเป็น X_1
3) เติมน้ำลงในกระบอกตวงเพื่อให้น้ำเข้าไปแทนที่ช่องว่างภายในตัวกลาง โดยการกระแทกก้นกระบอกตวง
4) เมื่อน้ำลงไปแทนที่ช่องว่างจนถึงปริมาตรที่ต้องการแล้วนำไปชั่งน้ำหนักเป็น X_2

การคำนวณ

$$Porosity(\%) = \left(\frac{(X_2 - X_1)}{\frac{\rho_{water}}{Volumn}}\right) \qquad \text{ก.2}$$

ก.3 วิธีวิเคราะห์ความชื้นของวัสดุตัวกลางโดยน้ำหนัก

1) ชั่งน้ำหนักตัวกลางที่ต้องการหาความชื้น ใส่ในกระบอกสำหรับหาความชื้น น้ำหนักที่ชั่งได้คือ น้ำหนักของวัสดุตัวกลาง และน้ำ (W_{sw}) และน้ำหนักกระป๋อง (W_a)
2) นำวัสดุตัวกลางไปอบที่อุณหภูมิ 105 – 110°C เป็นเวลาประมาณ 12 – 15 ชั่วโมง หรือจนกว่าน้ำหนักจะคงที่ น้ำหนักที่ชั่งได้ คือ น้ำหนักของวัสดุตัวกลางแห้ง (W_s) และ น้ำหนักกระป๋อง (W_a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ทำความสะอาดกระป๋องแล้วชั่งน้ำหนัก (W_a)

การคำนวณ

$$\text{ความชื้นของตัวกลางโดยน้ำหนัก} = \frac{(Wsw + Wa) - (Ws + Wa)}{(Ws + Wa) - Wa} \qquad \text{ก.3}$$

ก.4 วิธีวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด - ด่าง

ตอนที่ 1 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุตัวกลางสำหรับห้องปฏิบัติการ

1) ใช้ตะแกรงร่อนวัสดุตัวกลางเหนือกระดาษแล้วเกลี่ยตัวอย่างลงในตะแกรงใส่ถุงมือยางเพื่อป้องกันไม่ให้กรดหรือเบสจากมือของผู้ทดลองเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด – ด่างของวัสดุตัวกลาง
2) ค่อยๆเขี่ยให้วัสดุตัวกลางผ่านช่องตะแกรงลงไปบนกระดาษ หยิบเอาหิน และสิ่งปะปนอื่นๆออกจากตะแกรงทิ้งไป
3) นำวัสดุตัวกลางที่ร่อนแล้วใส่ลงถุงพลาสติกหรือภาชนะที่แห้ง และสะอาดปิดปากภาชนะ และเขียนฉลากไว้ที่ถุง (วัสดุตัวกลาง วันที่ทำการทดลอง)
4) เก็บวัสดุตัวกลางไว้ในที่แห้งจนกว่าจะใช้งาน

ตอนที่ 2 การตรวจวัดค่าความเป็นกรด – ด่างในวัสดุตัวกลาง

1) ชั่งวัสดุตัวกลางที่แห้ง และร่อนแล้ว 20 กรัม ในบีกเกอร์ขนาด 150 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ปิดทิ้งไว้สักครู่ เพื่อให้ได้อัตราส่วนวัสดุตัวกลางต่อน้ำ 1 : 5
2) ใช้แท่งแก้วคนสารต่อเนื่องเป็นเวลา 5 นาที
3) ทิ้งไว้ 1 ชั่วโมงเพื่อให้สารแขวนลอยตกตะกอนจะเห็นเป็นน้ำใสบริเวณด้านบนหรือกรองสารแขวนลอยออกจากเฟสของน้ำก่อนทำการวัดค่าความเป็นกรด – ด่าง
4) จุ่ม pH meter ลงไปในบริเวณน้ำใส อย่าจุ่มลงไปโดนวัสดุตัวกลางรอจนค่านิ่งแล้วอ่านค่าความเป็นกรด - ด่าง และรายงานผลของวัสดุตัวกลางที่วัดได้

ก.5 วิธีวิเคราะห์ปริมาณอินทรียวัตถุในวัสดุตัวกลาง (Walkley and Black, 1947)

1) ชั่งตัวอย่างวัสดุตัวกลาง 19 กรัม ใส่ในขวดชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2) ปิเปตต์สารละลายโพแทสเซียมไดโครเมท 1 10 มิลลิลิตร
3) เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 15 มิลลิลิตร เขย่าขวดแก้วเบา ๆ เป็นเวลา 12 นาที ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที
4) เติมน้ำกลั่น ประมาณ 50 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ให้เย็น
5) หยดอินดิเคเตอร์ ออร์โทฟีแนนโทรลีน 5 หยด
6) ไทเทรตด้วยสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 นอร์มอล เพื่อหาปริมาณโพแทสเซียมไดโครเมทที่เหลือจากปฏิกิริยาจนกระทั่งสีของสารละลายวัสดุตัวกลางเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีน้ำตาลแดงที่จุดยุติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7) บันทึกปริมาณโพแทสเซียมไดโครเมท และเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้

8) ทำ blank เช่นเดียวกันกับวิธีวิเคราะห์วัสดุตัวกลาง

9) คำนวณปริมาณอินทรีย์คาร์บอน และปริมาณอินทรียวัตถุ

การคำนวณ

$$\% \text{ Organic Carbon} = \frac{(B - T)}{\frac{N}{B}} \times \frac{100}{77} \times 3 \times \frac{100}{10^3} \times \frac{10}{W} \qquad \text{ก.4}$$

$$\% \text{ Organic Matter} = \% \text{ Organic Carbon} \times 1.724 \qquad \text{ก.5}$$

เมื่อ

N = ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไดโครเมท (นอร์มอล)

B = ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ไทเทรตกับ blank (มิลลิลิตร)

T = ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ไทเทรตกับตัวอย่างวัสดุตัวกลาง (มิลลิลิตร)

W = น้ำหนักวัสดุตัวกลาง (กรัม)

ก.6 การวิเคราะห์ไนโตรเจนทั้งหมดในวัสดุตัวกลาง (Total Nitrogen , N) (Bremner, 1965)

1) ชั่งวัสดุตัวกลาง 0.5 - 0.2 กรัม ใส่ลงใน Micro - Kjeldahl Tub

2) เติมสารเร่งสำเร็จรูปอัดเม็ด Kjeltab 2 เม็ด และเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 15 มิลลิลิตร

3) นำไปย่อยด้วยเตาย่อย (Digestion System) จนได้สารละลายสีขาวขุ่น

4) นำตัวอย่างในข้อ (3) มาเข้าเครื่องกลั่น Keltec System กำหนดให้เติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร และ NaOH 40% 25 มิลลิลิตร กลั่นประมาณ 4 นาที

5) เติมกรดบอริก 4 % 25 มิลลิลิตร ลงในขวดชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร หยด Mixed Indicator ประมาณ 6 -7 หยด สารละลายจะมีสีม่วงแดงนำไปรองรับการกลั่นจากข้อ (4) สารละลายนี้จะเปลี่ยนจากสีม่วงแดงเป็นสีเขียว และรองรับจนได้สารละลายในขวดชมพู่ประมาณ 150 มิลลิลิตร ไทเทรตสารละลายที่ได้จากการกลั่นในข้อ (5) กับกรดไฮโดรคลอริคมาตฐาน 0.1 N จนสีของสารละลายเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีม่วงแดง กลั่นBlank และไทเทรต เช่นเดียวกับวัสดุตัวกลาง อย่างน้อย 2 ตัวอย่าง

การคำนวณ

สมมติ ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน (X นอร์มอล)

ปริมาตรกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้กับ blank (B มิลลิลิตร)

จำนวนปริมาตรกรดไฮโตรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ (Y - B มิลลิลิตร)

วัสดุตัวกลาง A กรัม มีปริมาณไนโตรเจน $= X (Y - B)$ มิลลิสมมูล (meq) ก.7

วัสดุตัวกลาง 100 กรัม มีปริมาณไนโตรเจน $= \frac{X (Y - B) \times 100 \times 0.014}{A}$ กรัม ก.8

$$= \frac{1.4X(Y - B)}{A} \% \qquad \text{ก.9}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.7 การวิเคราะห์ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืช

1) เติมสารละลายสกัด Bray II 10 มิลลิลิตร เขย่า 1 นาที กรองด้วยกระดาษกรอง No.5 ขนาด 11.0 เซนติเมตร
2) ปิเปตต์สารละลายที่สกัดได้ในข้อที่ (1) อัตราส่วน 1 ส่วน ต่อสารละลายdevelopสี 16 ส่วน ลงในหลอดแก้วทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที ต่อจากนั้นนำไปอ่านค่าความเข้มข้นด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 882 nm
3) ทำ blank และชุดของสารละลายมาตรฐาน (Standard Set) เช่นเดียวกับข้อ (2)

การคำนวณ

$$\text{ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (P)} = \frac{B * df\,(sample) * R}{A * df\,(standard)}\ mg\ kg^{-1} \qquad \text{ก.10}$$

ก.8 การหาโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืช

1) ชั่งวัสดุตัวกลาง 2.5 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร
2) เติมสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตท 25 มิลลิลิตร
3) เขย่า 30 นาที ด้วยเครื่องเขย่า
4) กรองผ่านกระดาษกรอง No.5 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.50 เซนติเมตร
5) เตรียมสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมให้มีความเข้มข้น 0, 5, 10, 15 และ 20 ส่วนในล้านส่วน ด้วยสารแอมโมเนียมอะซิเตท
6) สารละลายที่กรองได้นำไปวัดปริมาณโพแทสเซียมโดยเครื่อง Flame Photometer ถ้ามีความเข้มข้นมากต้องเจือจางด้วยแอมโมเนียมอะซิเตท

การคำนวณ

$$\text{โพแทสเซียมที่มีประโยชน์ต่อพืช (avail.K)} = \frac{D * df * B}{A}\ mg\ kg^{-1} \qquad \text{ก.11}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของตัวกลาง

ตารางที่ ข - 1 ผลการทดสอบความหนาแน่น

ประเภทตัวกลาง	ปริมาตรกระบอกตวง (มิลลิลิตร)	น้ำหนักแห้ง (กรัม)	ความหนาแน่น (กรัมต่อลบ.ซม)
ปุ๋ยหมัก			
1	10	3.906	0.390
2	10	4.054	0.405
3	10	3.983	0.398
ค่าเฉลี่ย		3.981	0.398
ปุ๋ยมูลไก่			
1	10	6.840	0.684
2	10	6.763	0.676
3	10	6.911	0.691
ค่าเฉลี่ย		6.684	0.668

ตารางที่ ข - 2 ผลการทดสอบความพรุน

ประเภทตัวกลาง	ตัวอย่าง+กระบอกตวง (กรัม)	ตัวอย่าง+กระบอกตวง+น้ำ (กรัม)	ความพรุน (%)
ปุ๋ยหมัก			
1	38.44	44.08	56.41
2	38.19	43.89	56.93
3	38.89	44.61	57.13
ค่าเฉลี่ย	38.51	44.19	56.82
ปุ๋ยมูลไก่			
1	39.07	44.45	53.81
2	39.20	44.51	53.11
3	39.42	44.75	53.33
ค่าเฉลี่ย	39.23	44.57	53.41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข - 3 ความเป็นกรด – ด่างของตัวกลางหลัก

ตัวอย่าง	ความเป็นกรด - ด่าง	
	น้ำหนักแห้ง (กรัม)	ค่าpH
ปุ๋ยหมัก	20.0740	7.79
ปุ๋ยมูลไก่	20.7125	6.91

ตารางที่ ข - 4 ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Organic Matter, OM)

ตัวอย่าง	ครั้งที่	อินทรียวัตถุ			
		น้ำหนักแห้ง (กรัม)	FAS (มิลลิลิตร)		OM (%)
			Blank	ตัวอย่าง	
ปุ๋ยหมัก	1	0.0515	18.9	15.6	22.7726
	2	0.0540	18.9	15.6	21.7183
	3	0.0516	18.9	15.6	22.7284
ปุ๋ยมูลไก่	1	0.0533	18.9	11.7	48.0077
	2	0.0580	18.9	11.9	42.8919
	3	0.0514	18.9	11.9	48.3995

ตารางที่ ข - 5 ไนโตรเจนทั้งหมดในตัวกลางหลัก (Total Nitrogen , N)

ตัวอย่าง	ครั้งที่	ไนโตรเจนทั้งหมด			
		น้ำหนักแห้ง (กรัม)	HCl (มิลลิลิตร)		ไนโตรเจน (%)
			Blank	ตัวอย่าง	
ปุ๋ยหมัก	1	1.0062	0.2	3.9	0.4224
	2	1.024	0.2	3.6	0.3814
	ค่าเฉลี่ย	1.0151	0.2	3.75	0.4019
ปุ๋ยมูลไก่	1	1.0421	0.2	8.1	0.8709
	2	1.0232	0.2	8.3	0.9094
	ค่าเฉลี่ย	1.03265	0.2	8.2	0.8901

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข - 6 ฟอสฟอรัสในตัวกลางหลัก

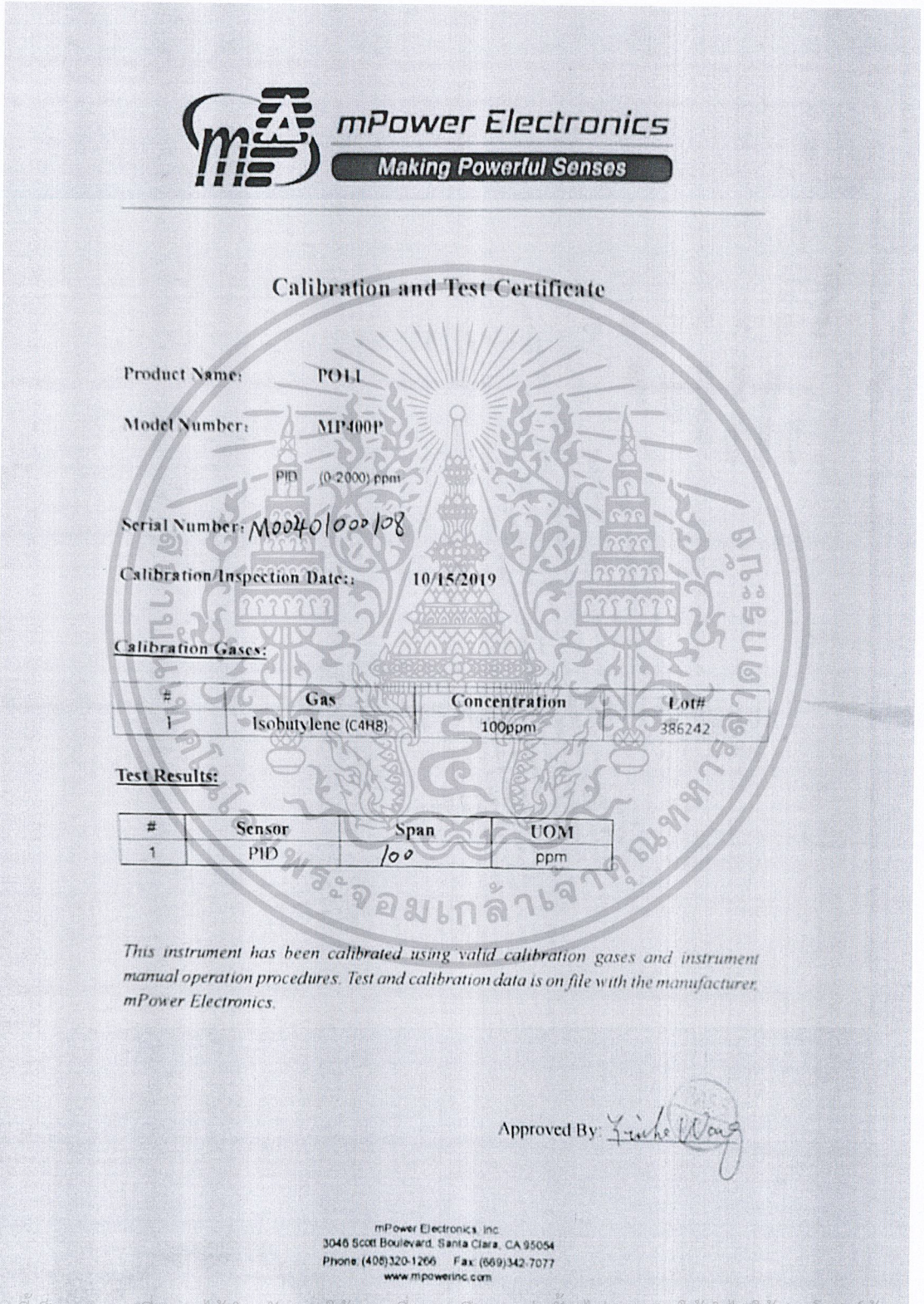
ตัวอย่าง	ครั้งที่	ฟอสฟอรัสที่มีประโยชน์ต่อพืช		
		น้ำหนักแห้ง (กรัม)	ความเข้มข้น (กรัม/มิลลิลิตร)	% ฟอสฟอรัส
ปุ๋ยหมัก	1	1.0064	16.831	0.0167
	2	1.0656	17.538	0.0164
	3	1.025	18.053	0.0169
ปุ๋ยมูลไก่	1	1.0073	59.732	0.1185
	2	1.0064	59.696	0.1186
	3	1.0083	60.438	0.1198

ตารางที่ ข - 7 โพแทสเซียมในตัวกลางหลัก

ตัวอย่าง	ครั้งที่	โพแทสเซียมที่มีประโยชน์ต่อพืช		
		น้ำหนักแห้ง (กรัม)	ความเข้มข้น (ppm)	% โพแทสเซียม
ปุ๋ยหมัก	1	2.5107	26.5517	0.2643
	2	2.5152	27.4138	0.2724
	3	2.5700	23.9655	0.2331
ปุ๋ยมูลไก่	1	2.5614	87.7586	0.8565
	2	2.5030	73.1034	0.7301
	3	2.5062	72.2414	0.7206

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใบรับรองการปรับเทียบเครื่อง Multi - Gas Monitors USA. ยี่ห้อ mPower (Model : POLI MP400P)



mPower Electronics
Making Powerful Senses

Calibration and Test Certificate

Product Name: POLI

Model Number: MP400P

PID (0-2000) ppm

Serial Number: M0040100108

Calibration/Inspection Date:: 10/15/2019

Calibration Gases:

#	Gas	Concentration	Lot#
1	Isobutylene (C4H8)	100ppm	386242

Test Results:

#	Sensor	Span	UOM
1	PID	100	ppm

This instrument has been calibrated using valid calibration gases and instrument manual operation procedures. Test and calibration data is on file with the manufacturer, mPower Electronics.

Approved By:

mPower Electronics, Inc.
3046 Scott Boulevard, Santa Clara, CA 95054
Phone: (408)320-1266 Fax: (669)342-7077
www.mpowerinc.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การศึกษาตัวกลางที่เหมาะสมในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย

ตารางที่ ค - 1 ความชื้นของตัวกลางปุ๋ยหมัก

	ความชื้นของตัวกลาง (%)			
วันที่	ปุ๋ยหมัก (C1)	ถ่านกัมมันต์ (C1)	ปุ๋ยหมัก (C2)	ถ่านกัมมันต์ (C2)
1	68.307	15.925	67.323	20.784
2	61.464	19.565	63.362	8.000
3	65.400	9.333	68.734	16.079
4	71.676	24.459	69.150	25.834
5	63.820	25.463	68.727	22.512
6	55.965	26.467	68.304	19.191
7	66.071	24.306	71.802	23.077
8	63.224	28.828	73.642	23.547
9	71.591	31.403	69.932	25.122
10	69.863	25.140	65.799	23.138
11	68.932	23.428	69.230	27.620
12	70.563	24.336	76.310	24.670
13	74.633	31.414	70.163	30.282
14	70.634	26.991	73.255	25.538
15	73.343	26.175	72.157	28.824
16	74.424	26.270	71.465	29.233
17	67.863	23.917	68.973	23.254
18	73.443	30.278	71.789	29.652
19	74.772	25.066	74.260	23.371
20	74.108	27.672	73.024	26.512

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค - 2 ความชื้นของตัวกลางปุ๋ยมูลไก่

	Moisture (%)			
วันที่	ปุ๋ยมูลไก่ (C1)	ถ่านกัมมันต์ (C1)	ปุ๋ยมูลไก่ (C2)	ถ่านกัมมันต์ (C2)
1	32.481	20.124	32.119	16.457
2	42.816	13.028	43.966	21.341
3	38.104	9.532	40.590	12.327
4	49.148	21.622	49.278	23.682
5	48.542	22.095	48.845	21.494
6	47.936	22.568	48.412	19.306
7	46.420	25.053	42.453	17.722
8	49.315	26.089	47.885	20.600
9	50.000	31.818	49.882	23.699
10	56.785	26.022	53.286	20.750
11	51.634	26.141	51.349	21.781
12	47.935	23.006	51.751	18.536
13	63.068	32.516	62.193	20.558
14	52.334	25.444	58.054	18.684
15	57.579	20.076	50.424	28.560
16	48.091	28.393	55.624	21.132
17	51.088	22.742	46.328	14.602
18	50.067	29.362	57.343	21.930
19	60.226	22.860	58.546	18.647
20	55.146	26.111	57.944	20.289

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค - 3 ความชื้นของตัวกลางปุ๋ยผสม

	Moisture (%)			
วันที่	ปุ๋ยผสม (C1)	ถ่านกัมมันต์ (C1)	ปุ๋ยผสม (C2)	ถ่านกัมมันต์ (C2)
1	44.094	19.061	56.654	20.784
2	13.312	9.862	57.910	8.000
3	47.608	13.908	54.459	16.080
4	59.716	25.772	67.683	25.834
5	57.537	27.154	65.050	22.513
6	55.357	28.537	62.418	19.190
7	36.290	25.668	60.100	23.077
8	64.249	27.335	59.826	23.547
9	60.267	28.986	56.842	25.122
10	64.247	25.520	59.751	23.138
11	56.635	28.852	60.177	27.620
12	58.547	22.085	57.190	24.670
13	62.020	33.013	58.372	30.282
14	61.972	26.981	62.708	25.538
15	60.404	29.439	64.404	28.824
16	61.606	25.799	67.820	29.232
17	60.579	27.005	58.856	23.253
18	74.552	29.266	63.764	29.651
19	60.384	23.568	55.611	23.371
20	67.468	26.417	59.687	26.511

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค - 4 ค่าความเป็นกรด – ด่างของตัวกลาง

ความเป็นกรด - ด่าง												
วันที่	ปุ๋ยหมัก (C1)	ถ่านกัมมันต์ (C1)	ปุ๋ยหมัก (C2)	ถ่านกัมมันต์ (C2)	ปุ๋ยมูลไก่ (C1)	ถ่านกัมมันต์ (C1)	ปุ๋ยมูลไก่ (C2)	ถ่านกัมมันต์ (C2)	ปุ๋ยผสม (C1)	ถ่านกัมมันต์(C1)	ปุ๋ยผสม (C2)	ถ่านกัมมันต์ (C2)
1	6	6	7	6	7	6	8	6	7	6	7	6
2	7	6	7	6	8	6	8	6	8	6	8	6
3	7	6	7	6	8	6	8	6	8	6	8	6
4	6	6	6	6	8	6	8	6	8	6	8	6
5	7	6	7	6	8	6	8	6	8	6	8	6
6	7	6	7	6	8	6	7	6	7	6	7	6
7	7	6	7	6	8	6	8	6	8	6	8	6
8	7	6	7	6	8	6	8	6	7	6	7	6
9	7	6	7	6	7	6	8	6	7	6	8	6
10	6	6	6	6	7	6	7	6	7	6	7	6
11	7	6	7	6	7	6	7	6	7	6	7	6
12	8	6	8	6	8	6	8	6	8	6	7	6

ตารางที่ ค - 4 (ต่อ) ค่าความเป็นกรด – ด่างของตัวกลาง

ความเป็นกรด - ด่าง												
วันที่	ปุ๋ยหมัก (C1)	ถ่านกัมมันต์ (C1)	ปุ๋ยหมัก (C2)	ถ่านกัมมันต์ (C2)	ปุ๋ยมูลไก่ (C1)	ถ่านกัมมันต์ (C1)	ปุ๋ยมูลไก่ (C2)	ถ่านกัมมันต์ (C2)	ปุ๋ยผสม (C1)	ถ่านกัมมันต์(C1)	ปุ๋ยผสม (C2)	ถ่านกัมมันต์ (C2)
13	8	6	8	6	7	6	7	6	7	6	7	6
14	8	6	7	6	7	6	7	6	7	6	7	6
15	8	6	7	6	7	6	7	6	7	6	7	6
16	8	6	8	6	7	6	7	6	7	6	7	6
17	8	6	8	6	7	6	7	6	7	6	7	6
18	7	6	7	6	7	6	7	6	7	6	7	6
19	6	6	6	6	7	6	7	6	6	6	6	6
20	6	6	7	6	7	6	7	6	7	6	7	6

มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ตารางที่ ค - 5 อุณหภูมิของตัวกลาง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)												
วันที่	ปุ๋ยหมัก (C1)	ถ่านกัมมันต์ (C1)	ปุ๋ยหมัก (C2)	ถ่านกัมมันต์ (C2)	ปุ๋ยมูลไก่ (C1)	ถ่านกัมมันต์ (C1)	ปุ๋ยมูลไก่ (C2)	ถ่านกัมมันต์ (C2)	ปุ๋ยผสม (C1)	ถ่านกัมมันต์ (C1)	ปุ๋ยผสม (C2)	ถ่านกัมมันต์ (C2)
1	30	30	30	31	30	32	30.5	31	30.5	32	31	
2	29	31	30	30.5	30	31	30	31	30	31	30	31
3	28	29	28	29	28	29	28.5	30	29	29	29	31
4	28	31	29	30	29	30	29.5	31	29	30	29	30
5	27	27	27.5	27	27.5	27.5	28	27.5	28	27.5	28	31
6	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	27.5
7	26	27	25	27	26	26	25	26	25.5	26	25	26
8	26	26	26	26	25	26	25.5	26	25	26	26	26
9	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
10	27.5	27.5	27.5	27	31	31	32	31	31	31	31	31
11	29	29	28.5	28	29.5	31	31	31	31	31	31	31
12	27	28	27	28	28	29	27	28.5	28	29	27	28.5

ตารางที่ ค - 5 (ต่อ) อุณหภูมิของตัวกลาง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)												
วันที่	ปุ๋ยหมัก (C1)	ถ่านกัมมันต์ (C1)	ปุ๋ยหมัก (C2)	ถ่านกัมมันต์ (C2)	ปุ๋ยมูลไก่ (C1)	ถ่านกัมมันต์ (C1)	ปุ๋ยมูลไก่ (C2)	ถ่านกัมมันต์ (C2)	ปุ๋ยผสม (C1)	ถ่านกัมมันต์ (C1)	ปุ๋ยผสม (C2)	ถ่านกัมมันต์ (C2)
13	26	25	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
14	27	27	27	27	27	27	27	28	27	27	27	28
15	27	27	27	27	27	27	27	28	27	27	26	28
16	26	27	26	27	26	27	26	27	27	27	26	27
17	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	29	28
18	26	29	26	29	26	28	26	29	26	28	26	29
19	26	26	26	26	26	25	26	26	26	25	26	26
20	27	26	27	27	27	26	27	27	26	27	27	26

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค - 6 ความสูงของตัวกลาง

ความสูงของตัวกลาง (เซนติเมตร)												
วันที่	ปุ๋ยหมัก (C1)	ถ่านกัมมันต์ (C1)	ปุ๋ยหมัก (C2)	ถ่านกัมมันต์ (C2)	ปุ๋ยมูลไก่(C1)	ถ่านกัมมันต์ (C1)	ปุ๋ยมูลไก่(C2)	ถ่านกัมมันต์ (C2)	ปุ๋ยผสม (C1)	ถ่านกัมมันต์ (C1)	ปุ๋ยผสม (C2)	ถ่านกัมมันต์ (C2)
1	12	5	10	4.5	10.5	5	8	4.5	10.5	4.5	9.5	3.5
2	11.5	4.5	9.5	4.5	10	4.2	8	4.5	9.5	4	9.5	3.5
3	11.5	4.5	9.5	4.5	10	4	8	4.5	9	4	9.5	3.5
4	11	4.5	9.5	4.5	10	4	8	4	8.5	4	8.5	3.5
5	10.5	4.5	9.5	4	10	4	8	4	8.5	4	8.5	3.5
6	10.5	4.5	9.5	4	10	4	8	4	8.5	4	8.5	3.5
7	10.5	4.5	9.5	4	10	4	8	4	8.5	4	8.5	3.5
8	10.5	4.5	9.5	4	10	4	7.5	4	8.5	4	8.5	3.5
9	10.5	4.5	9.5	4	9.5	4	7.5	4	8.5	4	8.5	3.5
10	10.5	4.5	9.5	4	9.5	4	7.5	4	8.5	4	8	3
11	10.5	4.5	9.3	4	9.5	4	7.5	3.9	8.5	4	8	3
12	10	4.5	9	4	9.5	4	7.5	3.8	8.5	4	8	3

ตารางที่ ค - 6 (ต่อ) ความสูงของตัวกลาง

ความสูงของตัวกลาง (เซนติเมตร)												
วันที่	ปุ๋ยหมัก (C1)	ถ่านกัมมันต์ (C1)	ปุ๋ยหมัก (C2)	ถ่านกัมมันต์ (C2)	ปุ๋ยมูลไก่(C1)	ถ่านกัมมันต์ (C1)	ปุ๋ยมูลไก่(C2)	ถ่านกัมมันต์ (C2)	ปุ๋ยผสม (C1)	ถ่านกัมมันต์ (C1)	ปุ๋ยผสม (C2)	ถ่านกัมมันต์ (C2)
13	10	4	9	4	9.5	4	7.5	3.5	8.5	4	8	3
14	10	4	9	4	9.5	4	7.1	3.5	8.5	4	8	3
15	10	4	9	4	9.5	4	7	3.5	8.5	4	8	3
16	10	4	9	4	9	4	6.5	3.5	8	4	8	3
17	10	4	8.5	4	9	4	6.5	3.5	8	4	8	3
18	10	4	8.5	4	8	4	6.5	3.5	8	3.5	8	3
19	10	3.5	8.5	3.8	7.5	4	6.5	3.5	8	3.5	8	3
20	10	3.4	8	3.2	7.5	3.8	6.5	3.5	7.5	3.5	8	3

มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ตารางที่ ค - 7 ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยหมัก C1 ที่ความเข้มข้น 1.2 ppm

Date	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO2 (ppm)		PM 2.5(ug/m3)		TEMP (°C)		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
1	5.742	60	1.1	0.7	1050	2369	26.0	19.0	31.1	33.3	100	82.5	39.16
2	5.742	60	1.2	0.6	2279	799	24.9	19.0	32.6	33.2	97.7	73.1	49.28
3	5.742	60	1.2	1.1	3913	1054	27.0	18.0	33.9	34.3	100	70.7	5.40
4	5.742	60	1.2	0.3	678	1082	21.9	17.0	30.2	31.5	100.0	83.6	70.45
5	5.742	60	1.0	0.3	669	544	17.0	14.0	29.6	28.4	100	63.5	71.17
6	5.742	60	1.1	0.2	831	405	32.0	16.0	27.3	28.0	100	77.2	82.13
7	5.742	60	1.0	0.3	1331	493	20.0	23.0	27.1	28.5	100	82.9	69.43
8	5.742	60	1.3	0.3	2775	801	40.2	37.0	30.4	31.5	100	73	73.72
9	5.742	60	1.2	0.4	2443	961	56.0	44.0	28,7	29.9	100	73.3	64.21
10	5.742	60	1.2	0.4	2551	692	52.0	41.0	31.8	30.9	91.2	70.5	68.76
11	5.742	60	1.4	0.3	1526	753	51.0	30.0	31.5	33.8	94.6	58.1	76.33
12	5.742	60	1.2	0.4	975	687	71.0	56.0	27.5	26.3	98.9	77.8	71.34
13	5.742	60	1.2	0.3	1470	710	42.0	44.0	28.0	30.9	100	52.6	75.82

ตารางที่ ค - 7 (ต่อ) ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยหมัก C1 ที่ความเข้มข้น 1.2 ppm

Date	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO2 (ppm)		PM 2.5(ug/m3)		TEMP (°C)		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
14	5.742	60	1.2	0.2	936	417	39.0	52.0	31.0	32.8	86.2	48.9	83.04
15	5.742	60	1.2	0.4	1102	870	33.0	41.0	27.9	30.7	100	58.3	67.38
16	5.742	60	1.4	0.4	1432	1034	40.0	34.0	29.2	30.0	100	75.2	72.30
17	5.742	60	1.3	0.4	1064	964	23.0	22.0	30.9	32.4	100	64.1	72.81
18	5.742	60	1.4	0.4	998	933	33.0	21.0	29.7	30.2	97.8	78.2	71.08
19	5.742	60	1.2	0.4	780	451	35.0	27.0	30.4	31.5	99	70.4	69.14
20	5.742	60	1.3	0.3	926	417	23.9	20.0	31.3	32.3	100	54.2	77.12

เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร

ตารางที่ ค - 8 ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยหมัก C2 ที่ความเข้มข้น 1.2 ppm

Date	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO2 (ppm)		PM 2.5(ug/m3)		TEMP (°C)		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
1	5.742	60	1.0	0.8	1007	2784	30.9	17.0	31.7	33.6	100	81.7	25.64
2	5.742	60	1.1	0.5	2494	721	22.0	20.0	32.9	34.2	100	68.9	52.47
3	5.742	60	1.1	1.0	3265	858	19.0	25.0	34.5	35.2	100	66.1	7.71
4	5.742	60	1.1	0.2	408	655	14.0	20.0	30.3	32.2	86.6	76.8	80.27
5	5.742	60	1.3	0.3	719	625	17.0	14.0	29.2	28.9	100	65.4	75.21
6	5.742	60	1.3	0.2	994	418	34.0	18.0	26.4	27.9	100	76.3	85.60
7	5.742	60	1.3	0.3	1892	471	20.0	25.0	27.8	29.0	100	81.5	75.67
8	5.742	60	1.3	0.3	3275	881	52.5	40.0	30.1	29.7	100	82.4	76.11
9	5.742	60	1.3	0.4	2828	753	63.0	46.0	29.8	30.3	100	71.7	68.08
10	5.742	60	1.2	0.4	2729	641	68.0	45.0	31.9	31.6	86.7	68.4	68.95
11	5.742	60	1.3	0.3	1971	838	44.0	28.0	32.8	34.3	83.4	57	74.36
12	5.742	60	1.1	0.3	952	424	79.0	53.0	28.8	29.9	95.7	66.0	71.70
13	5.742	60	1.3	0.3	1045	429	61.0	51.0	24.4	26.5	100	71.7	74.52

ตารางที่ ค - 8 (ต่อ) ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยหมัก C2 ที่ความเข้มข้น 1.2 ppm

Date	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO2 (ppm)		PM 2.5(ug/m3)		TEMP (°C)		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
14	5.742	60	1.3	0.3	1182	550	38.0	38.0	29.3	30.7	97.1	54.7	78.63
15	5.742	60	1.3	0.4	1171	995	37.0	49.0	27.7	30.6	100	58.6	69.52
16	5.742	60	1.2	0.4	1228	1018	39.0	31.0	30.8	30.5	100	75.5	67.58
17	5.742	60	1.4	0.3	809	751	25.0	22.0	31.3	32.1	95.7	66.2	76.48
18	5.742	60	1.3	0.4	707	639	24.0	23.0	30.2	30.6	95.9	78.1	71.08
19	5.742	60	1.4	0.4	1061	655	33.0	26.0	30.7	32.2	99.4	70.1	70.81
20	5.742	60	1.4	0.3	1130	1448	18.0	13.0	31.7	33.7	100	64.6	78.09

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ตารางที่ ค - 9 ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยหมัก C1 ที่ความเข้มข้น 2.0 ppm

Date	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO2 (ppm)		PM 2.5(ug/m3)		TEMP (°C)		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
1	5.742	60	2.0	0.9	1400	3454	31.6	20.0	31.5	33.6	100	84.0	55.45
2	5.742	60	1.9	0.6	4986	897	24.2	15.0	32.7	33.6	97.6	72.1	70.17
3	5.742	60	2.0	1.5	9315	1236	28.0	22.0	34.0	34.1	100	74.5	27.90
4	5.742	60	2.2	0.3	936	1016	19.3	18.0	30.9	32.1	97.6	81.4	85.24
5	5.742	60	1.7	0.3	1311	416	18.0	15.0	29.6	28.5	100	62.9	80.33
6	5.742	60	1.9	0.2	1133	415	23.0	17.0	27.5	27.6	100	79.2	89.49
7	5.742	60	2.1	0.3	3874	492	17.0	20.0	26.7	28.6	100	82.9	85.24
8	5.742	60	1.7	0.3	4581	914	38.8	40.0	30.3	31.1	100	72.9	79.78
9	5.742	60	2.0	0.4	4023	988	63.0	40.0	29.1	30.0	100	73	78.43
10	5.742	60	1.8	0.4	4316	727	54.0	44.0	31.7	31.0	91.6	70.6	78.36
11	5.742	60	2.1	0.3	2772	649	35.0	27.0	31.0	33.6	97.8	56.2	87.08
12	5.742	60	2.0	0.4	1314	618	51.0	58.0	27.5	27.7	97.4	73.6	81.96
13	5.742	60	2.3	0.3	2176	650	50.0	45.0	27.7	31.0	100	52.4	88.65

ตารางที่ ค - 9 (ต่อ) ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยหมัก C1 ที่ความเข้มข้น 2.0 ppm

Date	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO2 (ppm)		PM 2.5(ug/m3)		TEMP (°C)		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
14	5.742	60	2.2	0.2	1461	404	43.0	48.0	31.1	32.7	84.2	49.2	90.99
15	5.742	60	2.1	0.4	1449	699	32.0	39.0	27.6	30.7	100	58.1	83.09
16	5.742	60	2.3	0.4	1552	950	42.0	34.0	29.8	30.1	100	74.3	84.45
17	5.742	60	2.5	0.3	1223	823	26.0	23.0	31.5	32.2	100	65.5	86.38
18	5.742	60	2.3	0.4	1039	812	29.0	25.0	29.8	30.4	96.5	77.8	82.94
19	5.742	60	2.1	0.4	1092	413	33.0	28.0	30.2	31.6	99.5	70.2	81.85
20	5.742	60	2.2	0.3	1122	403	25.0	21.0	30.7	32.9	100	54.4	86.21

ตารางที่ ค - 10 ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยหมัก C2 ที่ความเข้มข้น 2.0 ppm

Date	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO2 (ppm)		PM 2.5(ug/m3)		TEMP (°C)		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
1	5.742	60	1.9	0.8	1296	2980	32.1	19.3	31.6	33.3	100	82.3	57.20
2	5.742	60	1.9	0.4	5192	599	26.0	18.0	32.4	34.4	100	68.7	78.23
3	5.742	60	2.0	1.1	8010	905	26.0	18.0	34.6	35.1	100	66.8	45.05
4	5.742	60	1.9	0.2	1051	637	17.0	21.0	29.5	32.0	96.3	77.5	88.15
5	5.742	60	2.0	0.3	810	746	17.0	18.0	29.4	30.5	90	64.4	83.51
6	5.742	60	2.3	0.2	1260	412	27.0	16.0	26.3	27.3	100	78.1	91.48
7	5.742	60	1.9	0.3	3719	471	17.0	25.0	28.4	29.0	100	81.6	84.49
8	5.742	60	1.8	0.4	4247	1108	56.4	41.0	29.9	30.3	100	79.2	78.76
9	5.742	60	2.1	0.5	4629	847	54.0	47.0	31.3	31.1	100	69.4	77.75
10	5.742	60	2.1	0.4	3659	777	54	43.0	32.6	31.9	89.5	67.4	80.87
11	5.742	60	2.0	0.3	2590	810	36.0	30.0	32.3	34.5	82.1	56.5	83.86
12	5.742	60	2.0	0.4	1202	545	51.0	34.0	29.2	30.9	88.5	65.6	82.67
13	5.742	60	1.8	0.3	1286	406	55.0	56.0	24.7	27.6	100	68.9	83.15

ตารางที่ ค - 10 (ต่อ) ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยหมัก C2 ที่ความเข้มข้น 2.0 ppm

Date	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO2 (ppm)		PM 2.5(ug/m3)		TEMP (°C)		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
14	5.742	60	2.1	0.3	1414	547	47.0	36.0	29.0	31.4	95.8	52.9	87.08
15	5.742	60	1.9	0.4	1279	865	39.0	48.0	29.0	30.6	98.8	58.1	79.34
16	5.742	60	2.1	0.4	1724	896	38.0	35.0	31.1	30.6	100	73.1	83.15
17	5.742	60	2.3	0.3	1060	706	25.0	22.0	31.2	32.1	95.1	64.1	86.55
18	5.742	60	1.8	0.4	955	641	23.0	25.0	29.8	30.7	97.2	77.7	79.91
19	5.742	60	2.5	0.4	1212	555	34.0	25.0	30.9	31.8	97.2	70.4	84.40
20	5.742	60	2.3	0.2	846	705	23.0	15.0	28.4	30.2	100	77.6	91.51

ตารางที่ ค - 11 ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยหมัก C1 ที่ความเข้มข้น 4.0 ppm

Date	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO2 (ppm)		PM 2.5(ug/m3)		TEMP (°C)		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
1	5.742	60	5.7	0.8	1770	3265	27.5	17.0	31.7	33.5	100	83.2	85.10
2	5.742	60	4.1	0.8	9999	996	22.3	15.0	32.7	33.9	98.1	72.6	81.17
3	5.742	60	3.8	1.1	9999	1050	22.0	18.0	34.0	34.0	100	72.8	70.26
4	5.742	60	4.6	0.3	1146	1108	13.0	20.0	31.4	32.3	95.1	79.8	92.74
5	5.742	60	5.0	0.3	1964	406	18.0	15.0	29.6	28.5	100	62.6	93.74
6	5.742	60	3.8	0.2	1318	400	25.0	18.0	27.7	27.8	100	78.8	94.82
7	5.742	60	2.9	0.3	4346	500	22.0	24.0	27.2	29.0	100	81.1	89.59
8	5.742	60	5.1	0.3	8056	869	46.1	41.0	30.2	30.2	100	77.1	93.42
9	5.742	60	4.9	0.4	6201	843	63.0	41.0	29.8	30.2	100	71.9	91.48
10	5.742	60	3.6	0.4	5606	689	52.0	44.0	31.8	31.1	92.4	70.4	89.42
11	5.742	60	4.4	0.3	4196	680	34.0	28.0	30.8	33.6	97.5	57.6	93.34
12	5.742	60	3.8	0.3	1473	402	44.0	55.0	27.7	28.4	91.1	70.2	91.43
13	5.742	60	4.5	0.3	3609	639	47.0	49.0	27.6	31.1	100	52.6	94.22

ตารางที่ ค - 11 (ต่อ) ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยหมัก C1 ที่ความเข้มข้น 4.0 ppm

Date	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO2 (ppm)		PM 2.5(ug/m3)		TEMP (°C)		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
14	5.742	60	4.5	0.2	2066	405	39.0	34.0	30.9	32.5	81.6	49.4	95.47
15	5.742	60	4.6	0.4	2468	869	37.0	44.0	27.9	30.7	100	59	91.58
16	5.742	60	3.8	0.4	2438	1002	38.0	35.0	30.3	30.4	100	73.6	89.93
17	5.742	60	4.7	0.3	1308	764	23.0	23.0	31.1	32.4	100	64.3	93.11
18	5.742	60	3.4	0.4	1171	725	29.0	23.0	29..8	30.5	97.1	77.5	88.68
19	5.742	60	4.6	0.4	1441	402	38.0	29.0	30.2	31.7	99.4	71.1	92.16
20	5.742	60	3.3	0.3	1220	525	24.6	16.0	29.9	32.9	100	55.9	89.55

ตารางที่ ค - 12 ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยหมัก C2 ที่ความเข้มข้น 4.0 ppm

Date	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO2 (ppm)		PM 2.5(ug/m3)		TEMP (°C)		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
1	5.742	60	4.0	0.8	1443	2742	28.1	15.1	31.9	33.9	100	80.4	80.27
2	5.742	60	3.8	0.4	999	637	27.0	19.0	32.0	33.9	100	69.8	88.79
3	5.742	60	3.7	1.0	9999	927	23.0	15.0	34.4	35.0	100	68.6	72.47
4	5.742	60	3.7	0.2	1260	684	14.0	20.0	29.5	32.0	98.1	77.7	93.64
5	5.742	60	3.7	0.3	1323	532	16.8	19.0	31.2	30.4	95.9	62.4	91.66
6	5.742	60	4.0	0.2	1442	404	25.0	16.0	26.2	27.4	100	76.7	94.65
7	5.742	60	3.1	0.3	4219	461	49.0	25.0	28.6	29.0	99.2	81.2	90.51
8	5.742	60	3.4	0.4	5820	1082	56.1	40.0	29.8	30.3	100	77.9	89.52
9	5.742	60	3.6	0.4	4959	580	51.0	41.0	31.1	30.2	98.2	70.2	89.46
10	5.742	60	4.4	0.4	5286	778	55.0	43.0	32.4	32.2	92.1	66.4	90.74
11	5.742	60	3.6	0.3	3807	733	52.0	31.0	31.9	33.8	90.8	58.4	91.51
12	5.742	60	4.3	0.4	2664	697	51.0	53.0	29.0	30.3	99.6	64.1	90.99
13	5.742	60	3.4	0.3	1616	405	66.0	52.0	25.1	27.9	100	67.1	91.08

ตารางที่ ค - 12 (ต่อ) ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยหมัก C2 ที่ความเข้มข้น 4.0 ppm

Date	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO2 (ppm)		PM 2.5(ug/m3)		TEMP (°C)		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
14	5.742	60	3.8	0.3	1786	554	44.0	36.0	29.0	31.7	93.7	53.5	93.34
15	5.742	60	4.4	0.4	1821	870	39.0	41.0	29.4	30.7	97.3	58.3	91.05
16	5.742	60	4.1	0.3	2595	834	34.0	35.0	31.1	30.6	100	73.3	91.58
17	5.742	60	4.6	0.3	1235	705	25.0	20.0	31.2	32.5	93.8	62.9	93.24
18	5.742	60	3.8	0.3	1224	528	19.0	23.0	30.0	30.9	96.8	75.4	90.88
19	5.742	60	4.7	0.4	1512	597	34.0	27.0	30.5	31.8	99.7	71.1	91.35
20	5.742	60	4.5	0.2	1192	794	25.0	14.0	28.5	30.6	100	81	96.05

ตารางที่ ค - 13 ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยมูลไก่ C1 ที่ความเข้มข้น 1.2 ppm

Date	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO2 (ppm)		PM 2.5(ug/m3)		TEMP (°C)		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
1	5.742	60	1.1	0.7	1088	2139	29.9	20.0	32.0	33.9	100	86.6	37.05
2	5.742	60	1.1	0.6	2150	826	26.0	25.0	31.9	32.7	100	73.6	50.52
3	5.742	60	1.0	1.0	2586	916	20.0	20.0	34.7	34.6	100	68.3	3.93
4	5.742	60	1.0	0.3	558	792	17.0	22.0	28.9	32.3	95.7	75.9	73.31
5	5.742	60	1.3	0.3	566	585	14.4	11.0	30.5	31.7	90.7	58.9	72.13
6	5.742	60	1.2	0.3	959	544	8.0	11.0	27.6	28.7	100	71.6	76.84
7	5.742	60	1.3	0.3	1586	473	18.0	24.0	28.1	29.4	96.8	79.6	76.84
8	5.742	60	1.4	0.3	3148	840	48.7	43.0	29.5	31.3	100	70.6	75.52
9	5.742	60	1.3	0.4	3901	1226	58.0	37.0	31.8	32.7	100	65.7	68.47
10	5.742	60	1.2	0.4	3236	1267	53.0	40.0	32.0	33.0	93.5	64	62.98
11	5.742	60	1.1	0.2	1211	408	68.0	37.0	30.8	31.2	93.3	66.8	81.05
12	5.742	60	1.4	0.3	1070	506	49.0	51.0	29.1	30.8	97.7	63.8	74.44
13	5.742	60	1.2	0.3	874	400	60.0	54.0	25.0	28.3	100	64.3	78.02

ตารางที่ ค - 13 (ต่อ) ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยมูลไก่ C1 ที่ความเข้มข้น 1.2 ppm

Date	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO2 (ppm)		PM 2.5(ug/m3)		TEMP (°C)		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
14	5.742	60	1.3	0.3	986	540	35.0	40.0	28.9	31.9	93.9	52.7	80.33
15	5.742	60	1.2	0.4	1059	789	39.0	50.0	29.1	29.5	96.6	60.7	69.33
16	5.742	60	1.3	0.3	1250	772	36.0	31.0	31.1	30.5	100	72.6	75.21
17	5.742	60	1.3	0.3	725	831	28.0	24.0	31.0	31.9	94.1	64.5	73.47
18	5.742	60	1.3	0.4	733	583	16.0	22.0	30.2	30.8	96	77.3	72.73
19	5.742	60	1.4	0.4	1087	774	33.0	27.0	31.2	32.9	98.5	68	69.05
20	5.742	60	1.4	0.4	795	2639	18.0	13.0	32.6	32.2	100	82.6	70.54

ตารางที่ ค - 14 ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยมูลไก่ C2 ที่ความเข้มข้น 1.2 ppm

Date	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO2 (ppm)		PM 2.5(ug/m3)		TEMP (°C)		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
1	5.742	60	1.0	0.9	1144	2975	32.2	19.0	31.3	33.5	100	81.4	16.39
2	5.742	60	1.1	0.4	2418	834	25.0	26.0	31.6	32.0	100	77.2	60.86
3	5.742	60	1.2	0.9	3464	650	23.0	29.0	33.4	33.6	100	67.0	21.39
4	5.742	60	1.2	0.3	849	816	23.4	22.0	29.0	32.7	100.0	75.6	73.80
5	5.742	60	1.2	0.3	832	593	36.3	14.0	32.0	33.0	93.6	56.7	73.88
6	5.742	60	1.2	0.3	817	561	32.0	12.0	27.2	28.9	100	71.9	78.02
7	5.742	60	1.3	0.3	2284	600	21.0	25.0	28.5	30.1	100	77.6	74.28
8	5.742	60	1.2	0.4	3021	1297	41.9	43.0	32.1	32.9	96.1	66.9	67.48
9	5.742	60	1.3	0.3	5355	1101	41.0	40.0	31.6	31.2	100	67	73.55
10	5.742	60	1.4	0.3	1524	762	53.0	38.0	32.0	33.2	95.8	64.8	77.20
11	5.742	60	1.3	0.3	1527	413	32.0	46.0	30.4	31.3	100	68.4	79.78
12	5.742	60	1.4	0.3	1130	455	54.0	51.0	30.0	30.8	93.6	65.4	76.19
13	5.742	60	1.3	0.3	1045	407	43.0	54.0	26.7	28.8	100	62.9	79.84

ตารางที่ ค - 14 (ต่อ) ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยมูลไก่ C2 ที่ความเข้มข้น 1.2 ppm

Date	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO2 (ppm)		PM 2.5(ug/m3)		TEMP (°C)		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
14	5.742	60	1.2	0.3	857	589	57.0	37.0	29.0	32.6	96.7	50.8	75.89
15	5.742	60	1.2	0.4	1149	824	38.0	43.0	28.5	29.6	98.9	60.2	70.63
16	5.742	60	1.3	0.3	1262	807	34.0	28.0	30.7	30.5	100	72.5	74.36
17	5.742	60	1.3	0.3	826	627	30.0	25.0	31.1	32.2	93.3	61.2	77.27
18	5.742	60	1.4	0.3	867	589	18.0	24.0	30.3	31.1	96.1	74.5	74.91
19	5.742	60	1.4	0.4	921	696	34.0	28.0	31.4	32.2	96.8	70.9	71.70
20	5.742	60	1.3	0.2	995	576	15.0	12.0	29.2	29.6	100	75.2	87.27

ตารางที่ ค - 15 ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยมูลไก่ C1 ที่ความเข้มข้น 2.0 ppm

Date	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO2 (ppm)		PM 2.5(ug/m3)		TEMP (°C)		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
1	5.742	60	2.0	0.7	1429	2155	27.7	18.0	32.1	33.9	100	79.8	65.30
2	5.742	60	2.0	0.9	6522	1005	26.0	25.0	31.6	32.3	100	75.8	54.76
3	5.742	60	1.8	1.1	9338	1032	20.0	19.0	34.2	34.0	100	70.4	40.46
4	5.742	60	1.7	0.3	936	912	16.7	22.0	28.8	32.3	100.0	75.7	84.06
5	5.742	60	2.4	0.3	841	519	11.5	13.0	30.6	31.3	84.6	59.9	86.87
6	5.742	60	2.2	0.2	1265	408	17.0	13.0	27.0	28.6	100	71.1	88.85
7	5.742	60	2.2	0.3	3335	441	20.0	24.0	27.7	29.7	100	79.1	85.78
8	5.742	60	2.2	0.4	4157	931	39.7	45.0	28.9	31.5	100	69.4	83.35
9	5.742	60	2.2	0.4	5599	1004	45.0	37.0	32.2	33.1	100	63.8	83.30
10	5.742	60	2.3	0.4	4328	1119	58.0	44.0	32.0	32.3	93.3	64.5	81.68
11	5.742	60	2.0	0.2	2363	401	30.0	33.0	30.8	31.1	91.4	66.4	89.06
12	5.742	60	1.8	0.4	1259	620	56.0	34.0	29.5	31.4	95.4	63.3	78.82
13	5.742	60	2.3	0.3	1413	407	48.0	52.0	25.5	28.6	100	63.4	88.33

ตารางที่ ค - 15 (ต่อ) ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยมูลไก่ C1 ที่ความเข้มข้น 2.0 ppm

Date	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO2 (ppm)		PM 2.5(ug/m3)		TEMP (°C)		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
14	5.742	60	1.8	0.3	1198	545	46.0	37.0	28.9	32.0	93.6	52.4	85.42
15	5.742	60	2.4	0.4	1487	902	38.0	52.0	29.3	29.8	95.3	60.6	83.56
16	5.742	60	1.9	0.3	1539	842	35	28.0	30.8	30.7	100	71.9	82.07
17	5.742	60	2.5	0.3	1044	682	29	23.0	31.2	32.1	93.5	63.6	87.77
18	5.742	60	2.0	0.3	1034	431	15	22.0	30.1	30.7	96.1	75	83.40
19	5.742	60	2.3	0.4	1265	703	34	26.0	31.6	32.8	97.6	68.2	82.07
20	5.742	60	2.5	0.2	1075	2127	26	14.0	28.4	33.4	100	74.5	91.81

ตารางที่ ค - 16 ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยมูลไก่ C2 ที่ความเข้มข้น 2.0 ppm

Date	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO2 (ppm)		PM 2.5(ug/m3)		TEMP (°C)		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
1	5.742	60	2.0	0.9	1400	3312	36.5	16.0	30.9	33.5	100	82.7	54.48
2	5.742	60	2.0	0.8	4701	1336	21.0	20.0	32.3	31.9	100	75.5	58.63
3	5.742	60	1.9	1.2	9414	1212	23.0	20.0	33.2	33.7	100	71.9	40.09
4	5.742	60	2.2	0.4	955	1276	19.0	24.0	29.3	32.7	97.1	76.5	81.57
5	5.742	60	1.8	0.4	1016	799	36.0	13.0	31.6	32.8	98.6	58.8	80.52
6	5.742	60	2.2	0.3	1256	743	40.0	13.0	26.9	28.7	100	72.9	86.29
7	5.742	60	2.1	0.3	3851	590	28.0	25.0	28.2	30.3	100	77.4	84.20
8	5.742	60	2.3	0.3	5062	1091	58.7	40.0	31.9	32.9	95.5	66.6	84.97
9	5.742	60	1.9	0.4	5293	1111	36.0	41.0	31.9	31.1	100	65.5	80.64
10	5.742	60	2.1	0.3	2897	707	50.0	37.0	32.2	33.6	94.8	61.9	84.83
11	5.742	60	2.1	0.2	2565	415	30.0	32.0	30.5	31.1	96.5	67.6	88.68
12	5.742	60	2.0	0.3	1373	497	51.0	50.0	30.1	30.8	93.4	63.7	82.56
13	5.742	60	2.1	0.3	1383	403	46.0	55.0	27.0	29.0	100	63.2	87.81

ตารางที่ ค – 16 (ต่อ) ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยมูลไก่ C2 ที่ความเข้มข้น 2.0 ppm

Date	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO2 (ppm)		PM 2.5(ug/m3)		TEMP (°C)		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
14	5.742	60	2.0	0.3	1270	525	40.0	38.0	28.9	32.7	97.2	49.7	87.47
15	5.742	60	2.3	0.4	1381	797	37.0	45.0	27.7	29.5	100	60.8	84.54
16	5.742	60	2.2	0.3	2685	778	30.0	27.0	30.9	31.0	100	68.8	84.92
17	5.742	60	2.2	0.3	937	717	33.0	25.0	31.3	32.2	91.6	62.6	85.82
18	5.742	60	2.1	0.4	1030	611	16.0	24.0	30.6	31.3	95.4	74.1	82.73
19	5.742	60	2.4	0.4	1166	657	32.0	28.0	31.4	31.9	97.3	72.3	83.20
20	5.742	60	2.1	0.3	1088	782	15.0	12.0	28.5	30.1	100	74.9	85.60

ตารางที่ ค - 17 ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยมูลไก่ C1 ที่ความเข้มข้น 4.0 ppm

Date	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO2 (ppm)		PM 2.5(ug/m3)		TEMP (°C)		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
1	5.742	60	4.6	0.7	1759	2213	36.0	16.0	32.2	33.9	100	75.2	84.54
2	5.742	60	4.3	0.7	9999	918	24.0	26.0	31.6	32.1	100	76.9	84.83
3	5.742	60	4.1	1.2	9999	1135	19.0	18.0	33.8	33.8	100	71.6	70.17
4	5.742	60	4.3	0.3	1214	870	20.5	22.0	28.6	32.5	99.6	75.3	93.55
5	5.742	60	3.0	0.3	1135	905	19.7	16.0	30.7	31.2	97.2	60.7	88.79
6	5.742	60	3.4	0.2	1475	408	14.0	11.0	27.2	28.3	100	71.7	93.28
7	5.742	60	4.2	0.3	4639	451	20.0	26.0	28.0	29.8	98.2	78.9	92.56
8	5.742	60	4.1	0.3	5721	719	47.7	44.0	28.9	31.9	100	68	91.86
9	5.742	60	3.8	0.3	5820	883	44.0	35.0	32.6	33.0	96.6	62.9	91.24
10	5.742	60	4.0	0.3	3883	705	65.0	36.0	32.0	33.8	95.5	60.8	92.16
11	5.742	60	3.3	0.3	2082	418	33.0	36.0	30.8	31.2	89.9	65.3	90.48
12	5.742	60	3.7	0.3	1846	459	46.0	48.0	29.6	31.1	94.8	62.8	91.05
13	5.742	60	3.6	0.3	1955	402	54.0	56.0	26.3	28.6	100	63.3	93.03

ตารางที่ ค - 17 (ต่อ) ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยมูลไก่ C1 ที่ความเข้มข้น 4.0 ppm

Date	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO2 (ppm)		PM 2.5(ug/m3)		TEMP (°C)		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
14	5.742	60	4.0	0.3	1581	604	42.0	39.0	28.8	32.2	96.3	52.1	92.67
15	5.742	60	3.3	0.4	2072	954	43.0	46.0	29.5	30.0	96	59.4	88.15
16	5.742	60	4.4	0.4	2982	869	31.0	34.0	30.9	30.5	100	72.9	91.84
17	5.742	60	4.6	0.3	1153	675	31.0	24.0	30.9	32.2	94.1	62.4	93.38
18	5.742	60	3.4	0.4	1108	739	17.0	22.0	30.1	30.7	96.6	77.3	88.58
19	5.742	60	5.1	0.4	1245	589	21.0	27.0	31.3	32.3	92.8	68.7	92.16
20	5.742	60	3.3	0.4	1296	2607	20.0	13.0	32.1	33.4	100	78.9	88.11

เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ตารางที่ ค - 18 ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยมูลไก่ C2 ที่ความเข้มข้น 4.0 ppm

Date	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO2 (ppm)		PM 2.5(ug/m3)		TEMP (°C)		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
1	5.742	60	5.7	0.9	2316	3226	29.8	17.0	31.0	33.0	100	79.3	83.56
2	5.742	60	4.1	1.0	8735	1377	24.0	26.0	31.5	32.3	100	76.4	74.83
3	5.742	60	3.5	0.4	1362	1222	31.0	29.0	30.0	32.6	100	74.4	88.85
4	5.742	60	4.4	0.4	1388	1160	26.0	24.0	29.5	32.7	100.0	76.3	91.10
5	5.742	60	4.2	0.3	1247	778	42.0	13.0	31.9	32.8	100	59.1	91.81
6	5.742	60	3.6	0.3	1442	817	24.0	15.0	28.5	26.7	100	81.5	91.56
7	5.742	60	4.3	0.4	5376	731	33.0	26.0	27.9	30.6	100	76.7	91.71
8	5.742	60	4.3	0.4	7125	1161	57.9	41.0	31.9	33.0	94	67.7	91.69
9	5.742	60	4.3	0.3	8536	883	65.0	40.0	32.1	31.1	99.7	65.1	92.65
10	5.742	60	4.3	0.3	3593	778	55.0	36.0	32.1	33.6	93.8	62.3	92.40
11	5.742	60	4.0	0.3	3464	437	38.0	37.0	30.7	31.1	94.3	68.3	92.40
12	5.742	60	4.4	0.3	2250	410	52.0	48.0	29.9	30.9	95.6	63.0	93.20
13	5.742	60	4.4	0.3	2323	412	47.0	52.0	26.9	29.2	100	62	93.97

ตารางที่ ค - 18 (ต่อ) ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยมูลไก่ C2 ที่ความเข้มข้น 4.0 ppm

Date	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO2 (ppm)		PM 2.5(ug/m3)		TEMP (°C)		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
14	5.742	60	3.6	0.2	1502	477	33.0	39.0	29.1	32.5	94.9	49.5	93.28
15	5.742	60	4.2	0.4	2017	842	39.0	50.0	28.5	29.4	98.7	61.3	91.29
16	5.742	60	3.6	0.3	2876	746	31.0	25.0	30.7	31.3	100	68	91.16
17	5.742	60	4.5	0.3	1196	692	28.0	24.0	31.3	32.1	90.8	63.7	93.13
18	5.742	60	3.7	0.4	1297	572	18.0	24.0	30.8	31.4	92.9	73.2	90.48
19	5.742	60	4.2	0.4	1495	705	37.0	27.0	31.5	31.8	96.2	72.3	90.51
20	5.742	60	4.7	0.4	1322	909	15.0	13.0	27.8	30.4	100	74.5	91.91

เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ตารางที่ ค - 19 ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยผสม C1 ที่ความเข้มข้น 1.2 ppm

Date	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO2 (ppm)		PM 2.5(ug/m3)		TEMP (°C)		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
1	5.742	60	1.1	0.4	1014	970	29.0	16.0	27.5	28.9	100	79.9	63.09
2	5.742	60	1.1	0.8	2024	896	27.0	26.0	31.3	32.4	100	73.9	30.52
3	5.742	60	1.2	0.4	991	1272	18.0	22.0	31.3	32.9	100	76.4	67.08
4	5.742	60	1.2	0.3	787	979	18.0	19.0	30.0	32.4	100.0	78.0	72.64
5	5.742	60	1.2	0.3	618	417	18.0	16.0	30.0	31.2	96.3	59.1	78.02
6	5.742	60	1.1	0.3	844	867	27.0	13.0	28.4	28.0	100	78.2	73.80
7	5.742	60	1.2	0.3	1530	458	36.0	29.0	27.8	28.8	100	85.4	75.97
8	5.742	60	1.2	0.4	3305	1228	48.5	45.0	32.1	33.0	94.4	65.7	69.80
9	5.742	60	1.2	0.6	3113	1657	62.0	18.0	31.9	31.9	96.5	67.8	50.06
10	5.742	60	1.3	0.4	1842	984	55.0	37.0	32.3	33.4	93.7	64.1	72.73
11	5.742	60	1.0	0.3	1353	515	40.0	40.0	30.2	30.5	100	71.9	67.38
12	5.742	60	1.3	0.3	1129	481	49.0	46.0	30.6	31.8	95.7	60.6	73.88
13	5.742	60	1.2	0.2	952	419	46.0	51.0	27.0	29.5	100	59.7	80.09

ตารางที่ ค – 19 (ต่อ) ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยผสม C1 ที่ความเข้มข้น 1.2 ppm

Date	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO2 (ppm)		PM 2.5(ug/m3)		TEMP (°C)		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
14	5.742	60	1.1	0.2	881	465	39.0	40.0	29.1	32.5	94.3	49.8	80.40
15	5.742	60	1.1	0.3	1019	1176	44.0	46.0	28.1	28.9	96.9	66.8	69.61
16	5.742	60	1.3	0.3	1440	817	28.0	23.0	30.5	31.4	100	68.4	75.74
17	5.742	60	1.3	0.2	735	831	34.0	27.0	31.6	32.1	89.2	65.7	80.40
18	5.742	60	1.3	0.3	794	778	17.0	29.0	31.5	31.5	89.7	74	74.36
19	5.742	60	1.3	0.4	1045	970	26.0	29.0	31.5	32.6	98.8	70.9	67.78
20	5.742	60	1.2	0.2	691	1322	25.9	8.0	31.5	34.1	100	66.9	86.91

ตารางที่ ค - 20 ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยผสม C2 ที่ความเข้มข้น 1.2 ppm

Date	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO2 (ppm)		PM 2.5(ug/m3)		TEMP		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
1	5.742	60	1.1	0.9	2558	915	23.3	21.0	31.7	32.4	100	81.4	19.92
2	5.742	60	1.1	0.9	2584	906	34.4	21.0	31.8	32.4	100	75.5	19.43
3	5.742	60	1.2	0.4	755	766	19.0	27.0	30.3	32.2	99.4	77.3	71.43
4	5.742	60	1.3	0.3	1038	746	20.0	21.0	32.0	33.0	100.0	74.6	73.88
5	5.742	60	1.0	0.2	769	413	26.0	16.0	29.0	30.3	99.5	59.2	79.84
6	5.742	60	1.2	0.2	1242	444	11.0	14.0	28.0	29.1	100	71.6	83.46
7	5.742	60	1.3	0.3	2095	557	27.0	29.0	28.2	29.5	100	84.6	75.67
8	5.742	60	1.3	0.3	3381	960	43.0	47.0	30.4	32.3	100	64.2	73.80
9	5.742	60	1.2	0.3	3318	614	63.0	42.0	31.2	31.1	96.5	65.7	78.16
10	5.742	60	1.3	0.2	1441	572	34.0	35.0	32.4	31.9	84.4	61	80.58
11	5.742	60	1.0	0.4	1474	806	45.0	51.0	30.3	28.4	100	82.4	60.62
12	5.742	60	1.1	0.3	1123	429	55.0	50.0	32.3	33.1	85.8	56.1	70.08
13	5.742	60	1.2	0.2	1017	402	47.0	50.0	27.5	29.5	100	56.8	81.11

ตารางที่ ค - 20 (ต่อ) ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยผสม C2 ที่ความเข้มข้น 1.2 ppm

Date	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO2 (ppm)		PM 2.5(ug/m3)		TEMP		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
14	5.742	60	1.2	0.2	913	412	56.0	61.0	30.1	32.7	90.1	48.8	82.46
15	5.742	60	1.3	0.3	1048	777	49.0	52.0	27.1	27.1	100	67.8	73.80
16	5.742	60	1.3	0.3	1413	721	30.0	27.0	30.8	31.4	100	66.7	76.41
17	5.742	60	1.3	0.2	953	644	37.0	27.0	31.2	32.3	91	64	87.58
18	5.742	60	1.2	0.2	803	419	21.0	25.0	32.3	32.1	86.4	68	86.42
19	5.742	60	1.3	0.2	1031	446	27.0	25.0	31.3	32.0	98.5	69.8	87.43
20	5.742	60	1.4	0.2	856	416	21.0	20.0	31.2	34.0	100	56.2	88.36

เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ตารางที่ ค - 21 ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยผสม C1 ที่ความเข้มข้น 2.0 ppm

Date	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO2 (ppm)		PM 2.5(ug/m3)		TEMP (°C)		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
1	5.742	60	2.0	0.4	1248	1113	33.0	27.0	28.2	29.7	100	80.3	77.89
2	5.742	60	2.0	1.0	5228	1085	26.0	20.0	31.8	32.6	100	74.7	48.65
3	5.742	60	2.0	0.4	1291	1226	16.0	23.0	31.0	32.5	100	78.4	81.28
4	5.742	60	2.0	0.3	1064	806	15.0	18.0	30.8	32.5	100.0	76.5	85.78
5	5.742	60	1.9	0.3	908	402	21.0	12.0	29.9	31.6	97.2	57.6	84.73
6	5.742	60	2.3	0.3	1292	816	21.0	14.0	28.5	28.2	100	77.6	86.63
7	5.742	60	2.0	0.3	3888	419	34.0	29.0	27.9	28.8	100	86.1	85.42
8	5.742	60	1.9	0.4	4500	1945	52.8	38.0	32.2	32.2	91.9	69	76.11
9	5.742	60	2.4	0.4	5270	943	55.0	40.0	31.8	31.9	95.5	65.4	85.06
10	5.742	60	2.1	0.3	2687	803	40.0	38.0	32.4	33.2	88.3	60.7	84.45
11	5.742	60	2.0	0.3	4201	510	47.0	41.0	30.0	30.7	100	71.9	82.94
12	5.742	60	2.3	0.3	1525	485	62.0	49.0	30.3	32.1	93.3	60.0	85.47
13	5.742	60	2.2	0.2	1504	407	49.0	48.0	27.0	29.5	100	58.1	89.09

ตารางที่ ค - 21 (ต่อ) ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยผสม C1 ที่ความเข้มข้น 2.0 ppm

Date	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO2 (ppm)		PM 2.5(ug/m3)		TEMP (°C)		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
14	5.742	60	2.3	0.2	1224	423	36.0	41.0	29.5	32.6	87.3	48.9	90.99
15	5.742	60	1.9	0.4	1511	968	43.0	49.0	28.4	29.1	97.6	62.4	80.81
16	5.742	60	2.0	0.3	2404	965	30.0	24.0	30.5	31.6	100	68	84.64
17	5.742	60	2.1	0.2	1072	865	37.0	27.0	31.3	32.1	91.2	65.9	89.46
18	5.742	60	1.8	0.3	986	796	17.0	27.0	31.6	31.7	88.9	71.1	80.64
19	5.742	60	2.1	0.4	1493	950	32.0	27.0	31.5	32.8	98.2	70.1	81.05
20	5.742	60	1.9	0.2	900	1680	24.6	8.0	32.4	34.1	100	69.7	90.77

เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ตารางที่ ค - 22 ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยผสม C2 ที่ความเข้มข้น 2.0 ppm

Date	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO2 (ppm)		PM 2.5(ug/m3)		TEMP (°C)		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
1	5.742	60	2.3	1.1	7682	1034	21.0	22.0	31.7	32.4	100	82.7	51.88
2	5.742	60	2.0	0.9	7216	952	30.1	20.0	31.8	32.2	100	75.6	52.90
3	5.742	60	2.0	0.4	1132	896	18.0	25.0	30.1	32.2	100	77.4	82.02
4	5.742	60	2.1	0.3	1173	853	24.0	22.0	31.5	32.7	100.0	75.8	83.86
5	5.742	60	1.9	0.2	817	400	29.0	16.0	29.5	30.8	100	58.5	87.35
6	5.742	60	1.6	0.2	1322	510	10.0	14.0	27.4	28.9	100	72.6	84.78
7	5.742	60	2.4	0.3	3759	483	21.0	26.0	28.1	29.7	100	82.8	88.00
8	5.742	60	1.7	0.3	4035	751	44.0	45.0	29.7	32.1	100	65.5	81.91
9	5.742	60	2.1	0.3	4885	620	48.0	40.0	31.2	31.2	94.6	65.7	86.50
10	5.742	60	1.6	0.2	2197	489	54.0	35.0	32.5	31.8	85	59.7	85.29
11	5.742	60	1.6	0.3	3040	599	49.0	42.0	30.4	29.2	100	79.5	80.40
12	5.742	60	2.0	0.3	1509	406	47.0	47.0	32.0	33.3	86.0	55.8	85.33
13	5.742	60	1.9	0.2	1529	414	49.0	47.0	27.6	29.5	100	57.1	88.33

ตารางที่ ค - 22 (ต่อ) ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยผสม C2 ที่ความเข้มข้น 2.0 ppm

Date	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO2 (ppm)		PM 2.5(ug/m3)		TEMP (°C)		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
14	5.742	60	1.9	0.2	1224	410	59.0	41.0	30.5	32.8	89.3	48.5	89.55
15	5.742	60	2.4	0.2	1326	630	53.0	50.0	27.4	27.9	100	66.2	90.21
16	5.742	60	1.9	0.3	1975	682	27.0	26.0	30.9	31.4	100	67.3	83.35
17	5.742	60	2.2	0.2	1154	546	38.0	28.0	30.8	32.4	92.3	63.3	92.61
18	5.742	60	2.5	0.2	1669	480	16.0	26.0	32.1	32.3	87.1	71.1	93.62
19	5.742	60	2.1	0.2	1192	644	32.0	18.0	31.7	32.0	98.6	73.3	92.42
20	5.742	60	1.8	0.2	945	838	26.0	10.0	31.5	33.6	100	61.8	90.94

เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร

ตารางที่ ค - 23 ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยผสม C1 ที่ความเข้มข้น 4.0 ppm

Date	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO2 (ppm)		PM 2.5(ug/m3)		TEMP (°C)		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
1	5.742	60	4.6	0.5	1473	1182	25.0	23.0	28.6	30.0	100	80.1	89.81
2	5.742	60	3.3	1.2	8887	1109	28.0	20.0	32.1	32.7	100	74.0	63.21
3	5.742	60	3.8	0.3	1461	853	18.0	22.0	31.3	32.7	100	75.8	91.18
4	5.742	60	3.9	0.4	1378	1295	20.6	22.0	31.2	32.8	100.0	76.2	89.81
5	5.742	60	4.0	0.3	1295	578	16.0	15.0	31.3	32.9	94.5	57.2	91.99
6	5.742	60	3.9	0.3	1812	948	20.0	12.0	29.1	28.2	100	77.4	91.51
7	5.742	60	3.7	0.3	5576	521	42.0	27.0	28.1	29.0	100	85.6	91.69
8	5.742	60	4.3	0.4	6667	1420	35.3	42.0	33.0	33.0	92.5	69.2	91.05
9	5.742	60	3.4	0.3	5896	777	45.0	43.0	31.5	31.3	95.6	66.1	90.85
10	5.742	60	4.2	0.3	3314	735	38.0	37.0	32.3	32.2	79.2	62.1	92.92
11	5.742	60	3.9	0.3	4533	422	64.0	37.0	30.5	31.3	100	70	91.81
12	5.742	60	3.9	0.4	1756	562	43.0	51.0	30.1	32.3	91.1	59.1	90.99
13	5.742	60	3.3	0.2	2220	414	44.0	51.0	27.0	29.5	100	56.8	93.24

ตารางที่ ค - 23 (ต่อ) ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยผสม C1 ที่ความเข้มข้น 4.0 ppm

Date	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO2 (ppm)		PM 2.5(ug/m3)		TEMP (°C)		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
14	5.742	60	3.7	0.2	1641	400	47.0	41.0	29.7	32.6	90.1	49	94.50
15	5.742	60	3.8	0.4	2411	849	41.0	45.0	28.4	29.3	98.8	60.8	90.57
16	5.742	60	3.6	0.3	3537	830	34.0	25.0	30.6	31.7	100	66.5	91.21
17	5.742	60	3.8	0.2	1272	828	31.0	26.0	31.3	32.1	90.9	65.9	93.76
18	5.742	60	4.5	0.3	1555	834	18.0	25.0	31.7	31.8	88.2	71.6	92.45
19	5.742	60	3.6	0.4	2144	1050	30.0	29.0	31.4	32.8	98.6	70.1	87.96
20	5.742	60	4.2	0.2	1169	2549	28.8	8.0	32.6	34.2	100	72.7	94.26

เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร

ตารางที่ ค - 24 ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยผสม C2 ที่ความเข้มข้น 4.0 ppm

Date	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO2 (ppm)		PM 2.5(ug/m3)		TEMP (°C)		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
1	5.742	60	4.0	0.9	9999	964	19.5	18.0	31.9	32.7	100	76.6	76.48
2	5.742	60	3.7	0.9	9999	938	27.5	20.0	31.8	32.4	100	76.7	75.67
3	5.742	60	4.1	0.4	1352	1075	17.0	27.0	30.0	32.2	100	76.1	90.42
4	5.742	60	4.1	0.3	1333	726	18.0	22.0	30.7	32.4	100.0	76.7	91.99
5	5.742	60	5.3	0.2	1085	400	23.0	17.0	29.6	31.2	100	59.2	95.37
6	5.742	60	3.5	0.3	1657	590	11.0	14.0	27.0	29.1	100	72.7	92.88
7	5.742	60	4.5	0.3	5988	637	26.0	25.0	28.0	30.0	100	82.6	93.11
8	5.742	60	3.8	0.3	5231	630	48.0	46.0	29.4	31.7	100	66.1	92.49
9	5.742	60	3.2	0.3	5263	671	49.0	41.0	31.3	31.1	93.8	65.5	90.12
10	5.742	60	4.5	0.3	3351	506	33.0	32.0	32.6	31.7	80.7	59.9	94.35
11	5.742	60	4.0	0.3	4037	497	44.0	40.0	30.6	30.0	100	73.8	91.74
12	5.742	60	4.1	0.3	3236	417	66.0	47.0	31.9	33.1	87.8	65.6	93.64
13	5.742	60	3.9	0.2	1842	407	48.0	47.0	27.8	29.7	100	57.2	93.72

ตารางที่ ค - 24 (ต่อ) ประสิทธิภาพการบำบัดของปุ๋ยผสม C2 ที่ความเข้มข้น 4.0 ppm

Date	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO2 (ppm)		PM 2.5(ug/m3)		TEMP (°C)		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
14	5.742	60	4.1	0.2	2162	419	56.0	40.0	30.7	32.8	87.3	49.1	95.35
15	5.742	60	3.3	0.3	1435	707	45.0	49.0	27.6	28.6	98.1	64.4	92.28
16	5.742	60	4.1	0.3	2367	797	25.0	25.0	31.3	31.6	100	66.3	91.53
17	5.742	60	4.6	0.2	1207	690	38.0	28.0	30.7	32.4	92.4	65.5	95.86
18	5.742	60	3.3	0.2	2407	573	18.0	24.0	32.3	32.1	86.7	70.6	95.16
19	5.742	60	3.3	0.3	1687	685	25.0	24.0	31.6	32.6	99.1	68	89.68
20	5.742	60	3.6	0.2	1214	947	27.3	9.0	31.7	33.6	100	64.2	95.50

เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร

ภาคผนวก ง
ผลการทดสอบความเข้มข้นของ
สารอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกิดจากวัสดุตัวกลาง

ตารางที่ ง - 1 ผลการทดสอบความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกิดจากวัสดุตัวกลาง

Date	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)					
			ambient (C1)	ambient (C2)	ambient (C3)	outlet (C1)	outlet (C2)	outlet (C3)
1	5.742	60	0.5	0.5	0.6	0.5	0.5	0.6
2	5.742	60	0.8	0.7	0.7	0.8	0.8	0.7
3	5.742	60	0.4	0.7	0.5	0.3	0.4	0.4
4	5.742	60	0.5	0.6	0.4	0.5	0.5	0.4
5	5.742	60	0.5	0.1	0.1	0.3	0.2	0.1
6	5.742	60	0.4	0.3	0.2	0.4	0.3	0.2
7	5.742	60	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	5.742	60	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	5.742	60	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	5.742	60	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	5.742	60	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	5.742	60	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง- 2 การจำลองสถานการณ์ปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยง่าย

นาทีที่	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	ครั้งที่6	ครั้งที่7	ค่าเฉลี่ย
0	5.1	5.6	5.7	4.8	4.5	4.4	4.9	5.0
1	2.8	2.9	2.9	2.0	2.0	2.5	2.5	2.5
2	1.4	1.4	1.5	1.3	1.3	1.3	1.4	1.4
3	1.1	1.2	1.2	1.1	1.1	1.0	1.2	1.1
4	0.9	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	1.0	0.9
5	0.8	0.8	0.9	0.8	0.8	0.7	0.9	0.8
6	0.7	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.8	0.7
7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.7	0.7
8	0.6	0.6	0.7	0.6	0.6	0.6	0.7	0.6
9	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.7	0.6
10	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.6	0.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้